

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

# **Návrh technologického postupu výroby součásti tažením z plechu s využitím MKP**

Project of Production Technology Process of the Part by  
Drawing from Sheet-metal  
with the Use of FEM

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Radek Čada, CSc.

Student:

Michal Janča

Ostrava 2009

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb, autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....

Michal Janča

Mnichov 332

793 26 VRBNO POD PRADĚDEM

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

JANČA, M. *Návrh technologického postupu výroby součásti z plechu s využitím metody konečných prvků*. Ostrava : katedra mechanické technologie—345, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 80 s. Bakalářská práce, vedoucí Čada, R.

Bakalářská práce se zabývá řešením napjatosti a deformací tvarového výtažku z tenkého plechu. Jedná se o krytku zásuvných dveří od firmy HOBES, spol. s r. o., Horní Benešov. V úvodu je popsána stávající technologie výroby výtažku. Následuje experimentální vyhodnocení tvářitelnosti používaného plechu. Tvar a velikost přístřihu byly zkonstruovány třemi metodami (metody dle ČSN 22 7303, metody využívající trajektorii maximálních smykových napětí a metod využívající k sestrojení přístřihu modul BSE v programu DYNAFORM 5.2) a následně porovnány. Na základě výsledků byl proveden finální návrh technologie výroby a ekonomický rozbor, při jakém počtu kusů se nový způsob výroby vyplatí.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

JANČA, M. *Proposal of technological process of production of metal plate component with usage of Finite Element Method*. Ostrava: Department of Mechanical technology – 345, Faculty of mechanical Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, 2009, 80 s. Bachelor thesis, supervisor Čada, R.

Bachelor thesis is engaged in resolution of tenseness and deformation of formative extract of sheetmetal. It is concerned with capping stript of automatic door by company HOBES, Ltd, Horní Benešov. In introduction it is described current technology of extract production. After that follows experimental evaluation of used metal plate formability. Shape and size of blanks were constructed with three methods (ČSN 22 7303 method, maximum shear stress line method and methods using BSE module in computer programme DYNAFORM 5.2) and subsequently collated. On the basis of outcome was performed final proposal of production technology and economic analysis, on what number of pieces is new production method paying off.

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>Úvod .....</b>   | <b>12</b> |
| <b>1 Rozbor stávající technologie výroby zadaného výtažku .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>2 Experimentální vyhodnocení tvářitelnosti používaného plechu .....</b>  | <b>15</b> |
| 2.1 Stanovení chemického složení .....  | 15        |
| 2.2 Stanovení mechanických vlastností tahovou zkouškou .....  | 16        |
| 2.3 Experimentální vyhodnocení vlastností materiálu pomocí napodobující zkoušky<br>dle Erichsena .....                            | 18        |
| 2.4 Vyhodnocení plošné anizotropie mechanických vlastností .....  | 21        |
| 2.5 Stanovení součinitelů normálové anizotropie .....   | 24        |
| 2.6 Stanovení exponentů deformačního zpevnění.....  | 27        |
| <b>3 Návrh tvaru zadané součásti při dodržení technologičnosti konstrukce .....</b>   | <b>31</b> |
| <b>4 Tvar a velikost přístřihu .....</b>  | <b>33</b> |
| 4.1 Konstrukce přístřihu krytu posuvných dveří dle ČSN 22 7303 .....  | 33        |
| 4.2 Konstrukce přístřihu krytu posuvných dveří v programu DYNAFORM 5.2 .....  | 37        |
| 4.3 Konstrukce přístřihu krytu posuvných dveří metodou řezů.....  | 39        |
| 4.4 Konstrukce přístřihu krytu posuvných dveří metodou TMSN.....  | 41        |
| 4.5 Vzájemné porovnání přístřihů krytu posuvných dveří.....   | 42        |
| <b>5 Simulace procesu tažení krytu zápusných dveří s využitím software.....</b>   | <b>43</b> |
| 5.1 Tvorba nástrojů v programu DYNAFORM 5.2 .....   | 43        |
| 5.1.1 Úprava přístřihů v programu DYNAFORM 5.2.....   | 46        |
| 5.2 Definování okrajových podmínek v programu DYNAFORM 5.2.....   | 47        |
| 5.3 Definování nástrojů a přístřihů v programu DYNAFORM 5.2 .....   | 47        |
| 5.4 Nastavení nástrojů v programu DYNAFORM 5.2 .....  | 49        |
| 5.5 Výpočet simulace v programu Submit Dyna Jobs.....   | 52        |
| 5.6 Zpracování výsledků simulace v programu ETA/Post Processor .....  | 52        |
| 5.7 Výsledky simulace procesu tažení.....   | 52        |
| 5.7.1 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu<br>sestrojeného dle ČSN 22 7303 .....                                     | 53        |
| 5.7.2 Simulace tažení krytu z přístřihu sestaveného pomocí BSE modulu<br>v programu DYNAFORM 5.2 s použitím brzdících žeber ..... | 56        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.7.3 Simulace tažení krytu z přístřihu sestrojeného pomocí BSE modulu<br>v programu DYNAFORM 5.2 bez použitím brzdících žeber .....                       | 58        |
| <b>6 Analýza kritických míst zadaného krytu a úprava tvaru součástí .....</b>  | <b>61</b> |
| 6.1 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného dle ČSN 22 7303<br>po úpravě zaoblení.....  | 62        |
| 6.2 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného dle BSE modulu po<br>úpravě zaoblení.....   | 64        |
| 6.3 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného metodou řezů po<br>úpravě zaoblení.....   | 67        |
| 6.4 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného metodou trajektorií<br>maximálních smykových napětí po úpravě zaoblení.....             | 69        |
| <b>7 Finální návrh technologie výroby zadaného krytu.....</b>  | <b>72</b> |
| 7.1 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného dle BSE modulu po<br>úpravě zaoblení tažné hrany tažnice i tažníku na hodnotu 4 mm..... | 73        |
| <b>8 Závěr .....</b>   | <b>76</b> |
| <b>9 Použitá literatura .....</b>  | <b>79</b> |
| <b>10 Seznam příloh .....</b>  | <b>80</b> |

## Seznam použitých značek a symbolů

|            |   |       |
|------------|---|-------|
| $A$        | tažnost   | (%)   |
| $A_{(x)}$  | tažnost ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu                              | (%)   |
| $A_{(0)}$  | tažnost ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu                              | (%)   |
| $A_{(90)}$ | tažnost ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu                             | (%)   |
| $A_{80}$   | tažnost při počáteční měřené délce zkušební tyče 80 mm                              | (%)   |
| $a$        | jmenovitá tloušťka plechu   | (mm)  |
| $\bar{a}$  | změřená střední tloušťka plechu   | (mm)  |
| $a_{rd}$   | vzdálenost středů zaoblení $r_d$ odpovídající straně $a$<br>konečného tvaru výtažku | (mm)  |
| $a_0$      | počáteční tloušťka zkoušené části zkušební tyče                                     | (mm)  |
| $b$        | šířka zkušebního vzorku   | (mm)  |
| $b_k$      | konečná šířka zkoušené části zkušební tyče  | (mm)  |
| $b_0$      | průměrná počáteční šířka zkoušené části zkušební tyče                               | (mm)  |
| $b_1$      | počáteční šířka užší části zkušební tyče  | (mm)  |
| $b_2$      | počáteční šířka širší části zkušební tyče   | (mm)  |
| $c$        | konstanta větší než nula  | (-)   |
| $C_x$      | součinitel pevnosti ve směru $x$ vůči směru válcování plechu                        | (MPa) |
| $d_r$      | průměr zaoblení bočních stěn výtažku  | (mm)  |
| $F$        | okamžité zatížení zkušební tyče   | (N)   |
| $F_p$      | síla přidržovače  | (N)   |
| $h$        | hloubka výtažku   | (mm)  |
| $h_d$      | hloubka výtažku bez zaoblení u dna  | (mm)  |
| $h_s$      | rozvinutá výška v podélných stěnách výtažku   | (mm)  |

|                 |  |       |
|-----------------|--|-------|
| $h_{sa}$        | zmenšení rozvinuté výšky delší strany  | (mm)  |
| $IE$            | hloubka prohloubení při zkoušce metodou podle Erichsena za podmínek (průměr tažníku 20 mm, průměr tažnice 27 mm)     | (mm)  |
| $\overline{IE}$ | střední velikost prohloubení dle Erichsena   | (mm)  |
| $k$             | materiálová konstanta  | (MPa) |
| $k_1$           | přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení dna výtažku                                 | (-)   |
| $k_2$           | přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení poloměru mezi dnem a svislou stěnou výtažku | (-)   |
| $k_3$           | přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení svislé stěny výtažku                        | (-)   |
| $k_4$           | přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení poloměru na tažné hraně výtažku             | (-)   |
| $k_5$           | přepočtový koeficient zahrnující předpokládané prodloužení vlivem tažení příruby výtažku                             | (-)   |
| $L$             | délka zkušební tyče  | (mm)  |
| $L_i$           | okamžitá měřená délka zkušební tyče po zatížení zkušební tyče $F_i$  | (mm)  |
| $L_k$           | konečná délka zkoušené části zkušební tyče   | (mm)  |
| $L_0$           | počáteční měřená délka zkušební tyče   | (mm)  |
| $L_0'$          | průměr kružnicového elementu deformační sítě   | (mm)  |
| $L_1$           | počáteční měřená délka užší části zkušební tyče  | (mm)  |
| $L_1'$          | okamžitá měřená délka užší části zkušební tyče po okamžitém zatížení $F$   | (mm)  |
| $L_2$           | počáteční měřená délka širší části zkušební tyče   | (mm)  |
| $L_2'$          | okamžitá měřená délka širší části zkušební tyče po okamžitém zatížení $F$  | (mm)  |
| $\Delta L$      | okamžité trvalé prodloužení zkoušené části zkušební tyče po okamžitém zatížení                                       | (mm)  |



|                       |  |                  |
|-----------------------|--|------------------|
| $l$                   | vzdálenost mezi pólem a počátečním bodem<br>logaritmické spirály                     | (mm)             |
| $l_c$                 | celková délka povrchové křivky výtažku v příslušném řezu                             | (mm)             |
| $l_d$                 | délka povrchové křivky dna výtažku   | (mm)             |
| $l_p$                 | délka povrchové křivky příruby výtažku   | (mm)             |
| $l_r$                 | délka povrchové křivky poloměru mezi dnem a svislou<br>stěnou výtažku                | (mm)             |
| $l_s$                 | délka povrchové křivky svislé stěny výtažku  | (mm)             |
| $l_t$                 | délka povrchové křivky poloměru na tažné hraně výtažku                               | (mm)             |
| $\max A_{80}$         | maximální směrová hodnota tažnosti   | (%)              |
| $\max P$              | maximální součinitel plošné anizotropie<br>mechanické vlastnosti                     | příslušné<br>(%) |
| $\max PA$             | maximální součinitel plošné anizotropie tažnosti                                     | (%)              |
| $\max PR_m$           | maximální součinitel plošné anizotropie meze pevnosti                                | (%)              |
| $\max PR_p$           | maximální součinitel plošné anizotropie smluvní meze kluzu                           | (%)              |
| $\max P(R_p/R_m)$     | maximální součinitel plošné anizotropie poměru smluvní<br>meze kluzu k mezi pevnosti | (%)              |
| $\max R_m$            | maximální směrová hodnota meze pevnosti  | (MPa)            |
| $\max R_{p\ 0,2}$     | maximální směrová hodnota smluvní meze kluzu   | (MPa)            |
| $\max R_{p\ 0,2}/R_m$ | maximální směrová hodnota poměru smluvní meze kluzu<br>k mezi pevnosti               | (-)              |
| $\min A_{80}$         | minimální směrová hodnota tažnosti   | (%)              |
| $\min R_m$            | minimální směrová hodnota meze pevnosti  | (MPa)            |
| $\min R_{p\ 0,2}$     | minimální směrová hodnota smluvní meze kluzu   | (MPa)            |
| $\min R_{p\ 0,2}/R_m$ | minimální směrová hodnota poměru smluvní meze kluzu<br>k mezi pevnosti               | (-)              |
| $n$                   | exponent deformačního zpevnění   | (-)              |
| $n_m$                 | průměrný exponent deformačního zpevnění  | (-)              |

|                     |   |     |
|---------------------|---|-----|
| $n_x$               | směrový exponent deformačního zpevnění  | (-) |
| $n_{xi}$            | směrový exponent deformačního zpevnění, stanovený z i-tého měření   | (-) |
| $n_0$               | exponent deformačního zpevnění ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu   | (-) |
| $n_{45}$            | exponent deformačního zpevnění ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu  | (-) |
| $n_{90}$            | exponent deformačního zpevnění ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu  | (-) |
| $\Delta n$          | stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění   | (-) |
| $P$                 | součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti   | (%) |
| $PA_{(x)}$          | součinitel plošné anizotropie tažnosti ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu                                   | (%) |
| $PA_{(45)}$         | součinitel plošné anizotropie tažnosti ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu                                  | (%) |
| $PA_{(90)}$         | součinitel plošné anizotropie tažnosti ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu                                  | (%) |
| $PR_{m(x)}$         | součinitel plošné anizotropie meze pevnosti ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu                              | (%) |
| $PR_{m(45)}$        | součinitel plošné anizotropie meze pevnosti ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu                             | (%) |
| $PR_{m(90)}$        | součinitel plošné anizotropie meze pevnosti ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu                             | (%) |
| $PR_{p(x)}$         | součinitel plošné anizotropie smluvní meze kluzu ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu                         | (%) |
| $PR_{p(45)}$        | součinitel plošné anizotropie smluvní meze kluzu ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu                        | (%) |
| $PR_{p(90)}$        | součinitel plošné anizotropie smluvní meze kluzu ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu                        | (%) |
| $P(R_p/R_m)$        | součinitel plošné anizotropie poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti   | (%) |
| $P(R_p/R_m)_{(45)}$ | součinitel plošné anizotropie poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu | (%) |

|                     |  |                   |
|---------------------|--|-------------------|
| $P(R_p/R_m)_{(90)}$ | součinitel plošné anizotropie poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti ve směru 90° vůči směru válcování plechu | (%)               |
| $p_p$               | měrný tlak přidržovače   | (MPa)             |
| $R_a$               | střední aritmetický odchylka od střední čáry profilu   | ( $\mu\text{m}$ ) |
| $R_m$               | pevnost v tahu   | (MPa)             |
| $R_{m(x)}$          | pevnost v tahu ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu  | (MPa)             |
| $R_{m(0)}$          | pevnost v tahu ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu  | (MPa)             |
| $R_{p0,2}$          | smluvní mez kluzu určená z trvalé deformace 0,2 % $L_0$ pod zatížením  | (MPa)             |
| $R_{p(x)}$          | smluvní mez kluzu ve směru $x^\circ$ vůči směru válcování plechu   | (MPa)             |
| $R_{p(0)}$          | smluvní mez kluzu ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu   | (MPa)             |
| $R_0$               | redukovaný poloměr přístřihu   | (mm)              |
| $r$                 | součinitel normálové anizotropie   | (-)               |
| $r_d$               | poloměr zaoblení mezi dnem a boční stěnou výtažku  | (mm)              |
| $r_m$               | průměrný součinitel normálové anizotropie  | (-)               |
| $r_x$               | směrový součinitel normálové anizotropie   | (-)               |
| $r_0$               | poloměr přístřihu v místě zaoblených bočních stěn  | (mm)              |
| $r_0$               | součinitel normálové anizotropie ve směru $0^\circ$ vůči směru válcování plechu                                  | (-)               |
| $r_{45}$            | součinitel normálové anizotropie ve směru $45^\circ$ vůči směru válcování plechu                                 | (-)               |
| $r_{90}$            | součinitel normálové anizotropie ve směru $90^\circ$ vůči směru válcování plechu                                 | (-)               |
| $\Delta r$          | stupeň plošné anizotropie součinitele normálové anizotropie  | (-)               |
| $S$                 | plocha přístřihu   | ( $\text{mm}^2$ ) |
| $S_p$               | účinná plocha přidržovače  | ( $\text{mm}^2$ ) |

## Úvod

Strojírenství vždy bylo a je neodmyslitelnou součástí ekonomiky naší země. Jeho výsledky jsou rozhodující pro mnoho dalších oborů. V době neustále se zvyšujících nároků na kvalitu a produktivitu výroby jsou výrobci nuceni ke stálému zdokonalování stávajících technologií produkce. Rozhodujícím trendem se stala snaha o stálé zvyšování produktivity výroby za současného snižování energetických a materiálových nároků. Velkou úlohu zde má strojírenské tváření.

Technologie tváření je široce využívána nejen v různých oblastech strojírenství, ale rovněž i ve stavebním, chemickém a spotřebním průmyslu nebo v hutní prvovýrobě (válcování plechů a profilů, tažení drátů, protahování a vytlačování trub apod.). Efektivnost technologie tváření spočívá ve značných úsporách materiálu, ve vysoké jakosti výrobků a vysoké produktivitě.

Plošné tváření se řadí k několika málo technologiím s minimálním odpadem a mnohostranným využitím ve výrobě. Další předností plošného tváření jsou nízké výrobní náklady, ale pouze za předpokladu nízké zmetkovitosti v lisovnách. Příčinou zmetků bývá nedostatečná technologičnost vyráběných součástí, překročení mezí tvářitelnosti materiálu nebo nesprávně zvolených přístřihů.

Technologie plošného tváření dosáhla v posledních desetiletích pozoruhodného rozvoje díky používání výpočetní techniky. Počítačovou podporu můžeme dnes nalézt ve všech etapách zhotovování nového výrobku. Od vlastního návrhu výlisku, návrhu lisovacího nářadí, numerické simulace procesu výroby až po počítačem řízené zhotovení nástrojů. Tento rozvoj je způsoben snahou firem o co nejrychlejší dodání kvalitních výrobků na trh při minimálních nákladech na jeho výrobu. V technické přípravě výroby dnes již běžně využívají všichni přední světoví výrobci automobilů mnoha druhů softwarů specializovaných na výpočetní analýzy a simulace tažení. Zejména se uplatňují softwary pracujících na principu metody konečných prvků (MKP). Výhodou těchto softwarů je možnost výpočtového ověření správnosti návrhu tvaru výrobků a lisovacích nástrojů. Případné následné úpravy se provádějí pouze v CAD/CAM modelu a technologický proces výroby se simuluje.

Bakalářská práce se zabývá řešením napjatosti a deformací tvarového výtažku krytu zápusných dveří pro HOBES, spol. s r. o. Bylo použito několik metod stanovení optimálního

tvaru přístřihu pro zadaný výtažek - metoda dle ČSN 22 7303, metoda řezů, metoda využívající trajektorií maximálních smykových napětí TMSN a metoda využívající k sestrojení přístřihu BSE modul v programu DYNAFORM 5.2. Následně byla provedena simulace procesu tažení ze všech variant přístřihů a výsledky byly vzájemně porovnány.

Cílem práce je také řešení napětíových a kinematických poměrů ve výtažku. Simulace tažení plechu krytu posuvných dveří byla provedena pomocí programu DYNAFORM 5.2 a výsledky porovnány pomocí několika analýz. Dále byla provedena korekce zaoblení tažné hrany tažnice i tažníku a opět byly všechny varianty simulovány pomocí programu DYNAFORM 5.2. Na základě těchto analýz bylo zformulováno doporučení vedoucí k racionalizaci stávající technologie výroby výtažku.

## **1 Popis stávající technologie výroby krytu posuvných dveří**

Pro tuto bakalářskou práci byla zadána součást krytu posuvných dveří od firmy HOBES, spol. s r. o., Horní Benešov. Výkres zadaného krytu se nachází v příloze A1. Tento výrobek měl být konstruován ve firmě HOBES, spol. s r. o., ale po několika společných poradách se technické vedení rozhodlo od této výroby ustoupit. Stalo se tak, protože zákazník trval na rozměrech uvedených ve výkresové dokumentaci a daná součást by musela být vyrobena dvěma operacemi (tažení, kalibrace). Takto stanovený postup je ovšem velice časově náročný a hlavně nákladný. Hlavní finanční zátěž je cena nástrojů, která by se pohybovala u složeného nástroje kolem 300 000,- Kč, což se pro plánovanou výrobu cca dvou tisíc kusů ročně nevyplatí. Proto bylo od plánované výroby ustoupeno.

Není však vyloučeno, že při snížení nákladů na výrobu se součást bude do budoucna zhotovovat ve firmě HOBES, spol. s r. o. Rapidní snížení finanční zátěže by představovala varianta vynechání kalibrovací části ve výrobě. O této alternativě lze uvažovat pouze v případě, že se provede korekce zaoblení hran zadaného výtažku krytu posuvných dveří. Takováto úprava je jedním z cílů Bakalářské práce. Po těchto změnách tvaru lze součást vyrábět na jednu operaci bez nadměrného výskytu rizik či prasklin. Bylo by možné kryt posuvných dveří vyrábět na hydraulickém lise značky REOS HP 100. Náskres lisu se všemi důležitými informacemi je v příloze A2.

## 2 Experimentální vyhodnocení tvářitelnosti používaného plechu

K zajištění spolehlivé výroby výtažku dle stanovené jakosti je nutné znát kromě požadovaných vlastností hotového výtažku i vhodnost plechu k hlubokému tažení. Ke stanovení způsobilosti materiálů k tváření byla vypracována řada zkoušek. Snahou je najít takové metody zkoušení, které by poskytly co největší obraz o chování materiálu při tažení výtažků.

V praxi existuje mnoho zkoušek pro hodnocení tvářitelnosti.

Lze je rozdělit takto:

- a) **zkoušky základní** – mezi základní zkoušky, které jsou normalizovány patří tahová zkouška, zkoušky tvrdosti, mikrostruktury a mikročistoty, jakosti povrchu, chemický rozbor, rentgenografická difrakce atd.
- b) **zkoušky napodobující** – patří mezi ně zkouška hloubením dle Erichsena, kalíškovací, Engelhardta – Grosse, hydraulická, klínová, Fukui atd.

Pro zadanou součást (kryt zápusných dveří) bylo použito několik zkoušek. Mezi základní patří: chemický rozbor, tahová zkouška. Mezi napodobujícími zkouškami je to hloubení dle Erichsena.

### 2.1 Stanovení chemického složení

Z plechové tabule (viz tab. 2.1) z oceli 11 305.21 byly ustřiženy obdélníkové tabulky o hmotnosti 200 g. K nastříhání se použilo ručních pákových nůžek v laboratoři katedry mechanické technologie fakulty strojní VŠB-TU Ostrava.

Tab. 2.1 Tabule plechu použitá pro experimentální vyhodnocení tvářitelnosti

| Polotovar                           | Materiál  | Číslo tavby | Číslo svitku |
|-------------------------------------|-----------|-------------|--------------|
| P 1,00 x 1000 - 2000 ČSN 42 6312.32 | 11 305.21 | 46 332      | 46 33205/1   |

Odběr vzorků pro chemickou analýzu byl proveden ve výzkumném ústavu hutnictví železa v Dobré v souladu s ČSN 42 1210. Rozbor chemického složení plechu by proveden ve VÚHŽ v Dobré podle ČSN 42 0510 až ČSN 42 0526.

Ocel 11 305.21 dle ČSN 41 1305 je vhodná pro velmi hluboké tažení a je speciálně uklidněná kyslíková [1].

Směrné chemické složení plechu vyráběného z oceli 11 305.21 [1] je uvedeno v tabulce 2.2. Výsledky rozboru chemického složení plechu, které jsou uvedeny v tabulce 2.3, potvrzují, že plech vyhovuje ČSN 41 1305.

Tab. 2.2 Směrné chemické složení oceli 11 305.21 dle ČSN 41 1305

| Označení oceli dle ČSN | C [hm. %] | Mn [hm. %] | P [hm. %]  | S [hm. %]  | Al [hm. %] |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 11 305.21              | max. 0,07 | max. 0,40  | max. 0,025 | max. 0,025 | max. 0,025 |

Tab. 2.3 Výsledky rozboru chemického složení plechu z oceli 11 305.21

| C [hm. %] | Mn [hm. %] | Si [hm. %] | P [hm. %] | S [hm. %] | Cr [hm. %] | Ni [hm. %] | As [hm. %] |
|-----------|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 0,065     | 0,29       | 0,02       | 0,016     | 0,018     | 0,041      | 0,044      | 0,019      |

| Pb [hm. %] | Cu [hm. %] | Al nevázaný [hm. %] | Al celkem [hm. %] | O [hm. %] | Ni [hm. %] |
|------------|------------|---------------------|-------------------|-----------|------------|
| 0,0004     | 0,066      | 0,053               | 0,059             | 0,0098    | 0,0051     |

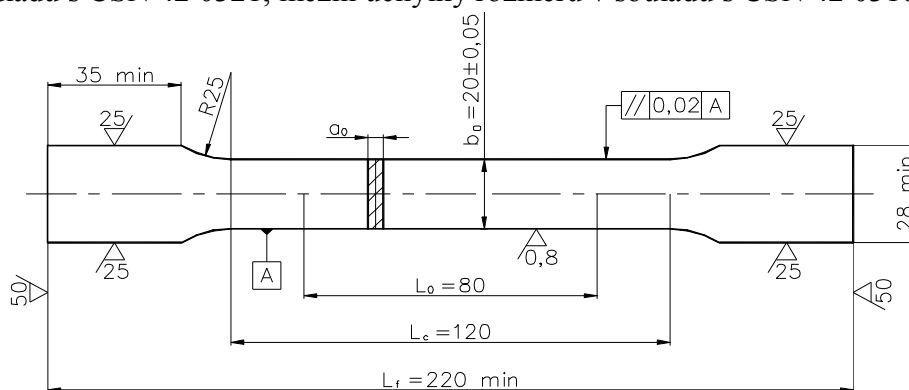
## 2.2 Stanovení mechanických vlastností tahovou zkouškou

Z plechových tabulí byly v TATRA, a. s., Kopřivnice nastříhány na ručních tabulových nůžkách NTE2000/2,5-B tabulky o rozměrech 300 x 400 mm orientovaných ve směrech 0°, 45°, 90° vůči směru válcování. Umístění tabulek na plechových tabulích bylo zvoleno



v souladu s ČSN 42 0305, která stanoví zásady odběru a zpracování zkušebních vzorků z ocelí při mechanické zkoušení. Vystřižené plechové tabulky následně sloužily pro zhotovení plochých zkušebních tyčí.

Na speciálním stříhadle v TATRA, a. s., Kopřivnice byly z každé plechové tabulky vystřiženy ploché zkušební tyče pro stanovení mechanických vlastností plechu. Rozměry tyčí byly v souladu s ČSN 42 0321, mezní úchytky rozměrů v souladu s ČSN 42 0310 (obr. 2.1)



Obrázek 2.1 Plochá zkušební tyč pro zkoušku tahem

Počáteční měřená délka zkušební ploché tyče byla  $L_0 = 80$  mm byla vyznačena s přesností na 1 % ryskami. U každé trhací tyče byla na třech místech (ve středu a na krajích zkoušené části tyče) změřena třmenovým mikrometrem počáteční tloušťka tyče a počáteční šířka  $b_0$ . Plocha průřezu pak byla vypočtena z průměrů naměřených hodnot.

Vyhodnocení mechanických vlastností, tj. smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$ , pevnosti v tahu  $R_m$  a tažnosti  $A_{80}$  bylo provedeno zkouškou jednoosým tahem dle ČSN 42 0310 v laboratoři katedry mechanické technologie fakulty strojní VŠB-TU Ostrava na zkušebním trhacím stroji s ručním řízením ZD 40, který odpovídá ČSN 25 0251. Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  byla zjištěna z tahového diagramu grafickou metodou dle ČSN 42 0310. Pro výpočet tažnosti  $A_{80}$  se po přetržení zkušební tyče posuvným měřítkem změřila její konečná délka  $L_k$  s přesností na 0,05 mm. Směrové hodnoty mechanických vlastností plechu byly vypočítány jako aritmetický průměr ze tří naměřených hodnot.

Směrné hodnoty mechanických vlastností daného tenkého plechu jsou uvedeny v tab. 2.4.

Tab. 2.4 Směrné hodnoty mechanických vlastností plechu z oceli 11 305.21

| Označení oceli | $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | $A_{80(90)}$ [min. %] |
|----------------|------------------|-------------|-----------------------|
| 11 305.21      | max. 215         | 290 ÷ 360   | 36                    |

Tab. 2.5 Zjištěné směrové a střední hodnoty mechanických vlastností vybrané tabule z tenkého plechu

| Mechanické vlastnosti | Směr válcování |       |       | Střední hodnota |
|-----------------------|----------------|-------|-------|-----------------|
|                       | 0°             | 45°   | 90°   |                 |
| $R_{p0,2}$ [MPa]      | 187,6          | 194,2 | 185,3 | 190,3           |
| $R_m$ [MPa]           | 339,2          | 347,5 | 336,8 | 342,8           |
| $R_{p0,2}/R_m$ [-]    | 0,553          | 0,559 | 0,550 | 0,555           |
| $A_{80}$ [%]          | 42,3           | 39,6  | 41,1  | 40,65           |

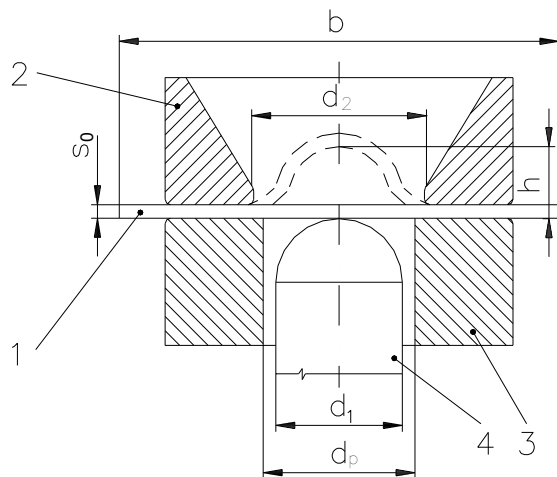
Zkouška jednoosým tahem dle ČSN 42 0310 jasně prokázala, že mechanické vlastnosti (jak smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , tak pevnost v tahu  $R_m$ ) zkušebních vzorků z oceli 11 305.21 jsou v pořádku, tudíž spadají do oblastí směrných hodnot mechanických vlastností plechu. ČSN 41 1305 pro ocel 11 305.21 (DC04) požaduje hodnotu tažnosti ve směru 90° vůči směru válcování plechu minimálně 36 %. Tomuto požadavku zkoušený plech vyhověl (tab. 2.5).

## 2.3 Experimentální vyhodnocení vlastností materiálu pomocí napodobující zkoušky dle Erichsena

Tato zkouška je často používána, protože je jednoduchá, rychlá a nenáročná na přípravu vzorků.

Zkouška hloubením dle Erichsena (obr. 2.2) se prováděla podle ČSN 42 0437. Plech byl upnut mezi přidržovač a tažnici. Tažník s kulovým zakončením se rovnoměrně posouval do středu zkušebního tělesa a vytvářel prohloubení. Kritériem tvářitelnosti plechu byla velikost dosaženého prohloubení  $IE$  (mm) v okamžiku vzniku průchozí praskliny.

Hodnoty  $IE$  ovšem leží v poměrně úzkém intervalu pro různé jakosti plechu, jsou proto zatíženy větší chybou měření.



Obrázek 2.2 Schéma napodobující zkoušky podle Erichsena

(1 – zkušební těleso, 2 – tažnice, 3 – přidržovač, 4 – tažník,  $d_1$  – průměr kulového zakončení tažníku,  $d_p$  – vnitřní průměr tažnice,  $d_2$  – vnitřní průměr přidržovacího kroužku,  $s_0$  – tloušťka zkušební vzorku,  $b$  – šířka zkušební vzorku,  $h$  – hloubka prohloubení)

V TATRA, a. s., Kopřivnice bylo na ručních nůžkách NTE 2000/2,5-B z tabule plechu (tab. 2.1) nastříháno 5 čtvercových zkušebních těles o straně 100 mm. Průměrné tloušťky zkušebních těles byly stanoveny s přesností na 0,01 mm jako aritmetické průměry z pěti měření mikrometrickým šroubem 0-25/0,01 mm dle ČSN 25 1451.[1].

Zkoušky hloubením byly provedeny v laboratoři katedry nauky o kovech fakulty metalurgie a materiálového inženýrství VŠB-TU Ostrava na přístroji E – 1, který odpovídal požadavkům ČSN 42 0406. Při všech zkouškách se použil tažník s kulovým zakončením průměru 20 mm a tažnice s otvorem průměru 27 mm.

Před každou zkouškou byly obě strany zkušební tělesa potřeny plastickým mazivem, tj. mazacím tukem G 3, který obsahuje minimálně 5 hm. % lupínkového grafitu. U každého čtvercového zkušební tělesa se provedlo jedno prohloubení v jeho středu.

Rychlost posuvu tažníku byla dodržena v rozmezí 5 - 20 mm/min, jak je stanoveno v ČSN 42 0406. Každá prohloubení se změřily pomocí posuvné a noniové stupnice přístroje s přesností na 0,05 mm.

Výsledky zkoušek hloubením plechu z oceli 11 305.21 tloušťky 1 mm dle Erichsena jsou uvedeny v tab. 2.6.

Tab. 2.6 Výsledky zkoušek hloubením dle Erichsena

|   |              |      |                             |                           |      |
|---|--------------|------|-----------------------------|---------------------------|------|
| Jmenovitá tloušťka plechu                     |              |      | a = 1.00 mm                 |                           |      |
| Mezní úchylka tloušťky plechu dle ČSN 42 6312 |              |      | ±0,07 mm                    |                           |      |
| Šířka zkušební vzorku – strana čtverce        |              |      | b = 100 mm                  |                           |      |
| Vnitřní průměr raznice                        |              |      | d <sub>2</sub> = 27±0,05 mm |                           |      |
| Číslo měření                                  | Číslo vzorku |      |                             |                           |      |
|   | 1            | 2    | 3                           | 4                         | 5    |
| 1   | 1,03         | 1,04 | 1,04                        | 1,04                      | 1,04 |
| 2   | 1,03         | 1,03 | 1,04                        | 1,04                      | 1,04 |
| 3   | 1,04         | 1,04 | 1,04                        | 1,03                      | 1,04 |
| 4   | 1,04         | 1,04 | 1,04                        | 1,04                      | 1,04 |
| 5   | 1,03         | 1,04 | 1,04                        | 1,04                      | 1,04 |
| Střední tloušťka plechu                       | 1,03         | 1,04 | 1,04                        | 1,04                      | 1,04 |
| IE  | 10,9         | 11,0 | 10,7                        | 10,8                      | 10,9 |
| Střední tloušťka tabule plechu:               |              |      |                             | $\overline{a} = 1,04$ mm  |      |
| Střední hodnota vzniklého prohloubení:        |              |      |                             | $\overline{IE} = 10,9$ mm |      |

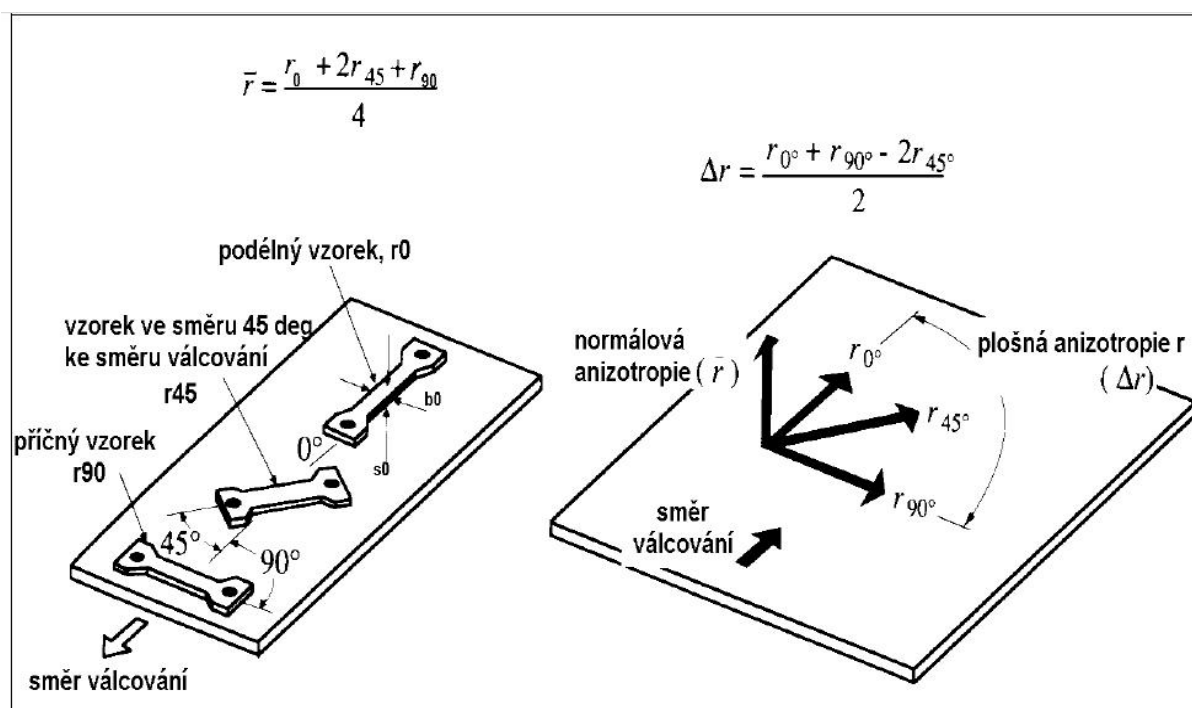
V ČSN 41 1305 je pro tenký plech 11 305.21 tloušťky 1,00 mm předepsáno nejnižší prohloubení podle Erichsena  $IE = 10,7$  mm.

Na VŠB-TU Ostrava byla zjištěna střední hodnota prohloubení dle Erichsena 10,9 mm. Tato hodnota spolu s dalšími pěti hodnotami uvedenými v tab. 2.6 zcela vyhovuje požadavkům ČSN 41 1305.

Z výsledků vyplývá, že zkoumaný plech 11 305.21 je dostatečně plastický, ustálený, a proto je vhodný k hlubokému tažení.

## 2.4 Vyhodnocení plošné anizotropie mechanických vlastností

Anizotropií se rozumí nestejnomyšlnost vlastností v různých směrech souřadného systému. Při posuzování anizotropie je materiál považován za homogenní, charakterizovaný třemi ortogonálními osami anizotropie, za materiál ortogonálně anizotropní neboli ortotropní. Osa x se ztotožňuje se směrem válcování, který se označuje jako směr 0. Při posuzování anizotropie plechů se rozlišuje anizotropie plošná (v rovině plechu) a normálová (ve směru tloušťky plechu) viz obr.2.3



Obrázek 2.3 Základní pojmy definice anizotropie

Pro posouzení vhodnosti daného plechu k hlubokému tažení je nutno vzít v úvahu plošnou anizotropii těchto mechanických vlastností: meze kluzu, pevnosti v tahu, tažnosti. Dále také součinitele plastické anizotropie, exponentu deformačního zpevnění a maximálního rovnoměrného prodloužení. Ke zjištění plošné anizotropie jsou potřebné výsledky tahových zkoušek zkušebních tyčí odpovídajících ČSN 42 0321, odebraných z plechu ve směru 0°, 45°, 90° vůči směru válcování. Vyhodnocení součinitelů plošné anizotropie se provádí podle ČSN 42 0437.

Plošná anizotropie mechanických vlastností se vyjadřuje pomocí součinitelů plošné anizotropie podle následujících vztahů [1]:

$$PR_{p(x)} = \frac{R_{p(x)} - R_{p(0)}}{R_{p(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

$$PR_{m(x)} = \frac{R_{m(x)} - R_{m(0)}}{R_{m(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.2)$$

$$P(R_p / R_m)_{(x)} = \frac{(R_p / R_m)_{(x)} - (R_p / R_m)_{(0)}}{(R_p / R_m)_{(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

$$PA_{(x)} = \frac{A_{(x)} - A_{(0)}}{A_{(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

kde  $P$  je součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti,

$x [^\circ]$  je úhel zvoleného směru v rovině plechu vůči směru válcování,

$0 [^\circ]$  je úhel orientace odpovídající směru válcování.

Pro úplnost popisu průběhu anizotropie plechu je vhodné pro jednotlivé mechanické hodnoty vypočítat maximální součinitele plošné anizotropie podle vztahů [1]:

$$\max PR_p = \frac{\max R_{p0,2} - \min R_{p0,2}}{\min R_{p0,2}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

$$\max PR_m = \frac{\max R_m - \min R_m}{\min R_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.6)$$

$$\max P(R_p / R_m) = \frac{\max R_{p0,2} / R_m - \min R_{p0,2} / R_m}{\min R_{p0,2} / R_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

$$\max PA = \frac{\max A_{80} - \min A_{80}}{\min A_{80}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.8)$$

kde  $\max P$  je maximální součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti,  $\max R_{p0,2}$ ,  $\max R_m$ ,  $\max R_{p0,2}/R_m$ ,  $\max A_{80}$  je maximální směrová hodnota smluvní meze kluzu, meze pevnosti, poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti a tažnosti,  $\min R_{p0,2}$ ,  $\min R_m$ ,  $\min R_{p0,2}/R_m$ ,  $\min A_{80}$  je minimální směrová hodnota smluvní meze kluzu, meze pevnosti, poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti a tažnosti.[1].

Ze zjištěných směrových hodnot mechanických vlastností (tab. 2.5) vyhodnocovaného plechu z oceli 11 305.21 byly vypočteny hodnoty součinitelů plošné anizotropie smluvní meze kluzu v tahu  $PR_{p0,2}$ , meze pevnosti v tahu  $PR_m$ , podílu  $R_{p0,2}/R_m$  a tažnosti  $PA_{80}$ . Tyto vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.7. Maximální hodnoty plošné anizotropie jsou uvedeny v tab. 2.8. Byly vypočítány dle vzorců (2.5) až (2.8).

Tabulka 2.7 Hodnoty součinitelů plošné anizotropie mechanických vlastností plechu

| koeficient         | směr |       |       |
|--------------------|------|-------|-------|
|                    | 0°   | 45°   | 90°   |
| $PR_{p0,2}$ [%]    | 0,00 | 3,52  | -1,23 |
| $PR_m$ [%]         | 0,00 | 2,45  | -0,71 |
| $R_{p0,2}/R_m$ [%] | 0,00 | 1,08  | -0,54 |
| $PA_{80}$ [%]      | 0,00 | -6,38 | -2,83 |

Tabulka 2.8 Maximální součinitelé plošné anizotropie plechu

| Maximální součinitel<br>plošné anizotropie | Ocel 11 305.21 |
|--|----------------|
| $\max PR_{p0,2} \quad [\%]$                | 4,81           |
| $\max PR_m \quad [\%]$                     | 3,18           |
| $\max R_{p0,2}/R_m \quad [\%]$             | 1,64           |
| $\max PA_{80} \quad [\%]$                  | 6,82           |

## 2.5 Stanovení součinitelů normálové anizotropie

Nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu oproti mechanickým vlastnostem ve směru kolmém na rovinu plechu, tj. ve směru tloušťky, vyjadřuje plastická anizotropie plechů.[1].

Plastická anizotropie plastické deformace v daném směru  $x$  vůči směru válcování plechu se vyjadřuje bezrozměrným číslem – součinitelem plastické anizotropie  $r_x$ .

vztah pro součinitele plastické anizotropie:

$$r_x = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{s_0}{s_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{L_k \cdot b_k}{L_0 \cdot b_0}} \quad [-] \quad (2.9)$$

kde jsou  $\varphi_b, \varphi_s$  logaritmické deformace ve směru šířky a tloušťky,

$L_0, b_0, s_0$  počáteční délka, šířka a tloušťka zkoušené části zkušební tyče,

$L_k, b_k, s_k$  konečná délka, šířka a tloušťka zkoušené části zkušební tyče.



Význam a smysl součinitele plastické anizotropie jako kritéria vhodnosti plechů pro hluboké tažení je v tom, že vyjadřuje odolnost plechu proti ztenčování tloušťky stěny v průběhu hlubokého tažení. Čím větší je hodnota součinitele, tím je plech odolnější proti ztenčování a tím více je vhodný k hlubokému tažení.

Jako kritérium tvářitelnosti plechu se používá hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie podle vztahu [1]:

$$\bar{r} = \frac{1}{4} \cdot (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (2.10)$$

kde  $r_0, r_{45}, r_{90}$  jsou součinitelé plastické anizotropie ve směrech  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  vůči směru válcování plechu.

Cípovitost výtažků se hodnotí podle stupně plošné anizotropie součinitele plastické anizotropie  $\Delta r$  dle ČSN ISO 10113:

$$\Delta r = \frac{1}{2} \cdot (r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (2.11)$$

Je-li  $\Delta r > 0$ , cípy se tvoří ve směrech  $0^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu, tj. ve směrech maximálních hodnot součinitelů  $r_x$ . Je-li  $\Delta r < 0$ , cípy se tvoří ve směrech  $+45^\circ$  a  $-45^\circ$  vůči směru válcování. Je-li  $\Delta r = 0$ , cípy se netvoří.

Čím je hodnota  $\bar{r}$  vyšší a čím je nižší hodnota  $\Delta r$ , tím je plech odolnější proti ztenčování.

Směrné hodnoty váženého průměru součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$  pro hodnocení tvářitelnosti plechů nejsou doposud stanoveny normou. Zatím je možné použít návrh zatřídění plechů podle Shawkiho [1]:

- a) nízká tvářitelnost  $r_m < 1,25$ ,
- b) dobrá tvářitelnost  $r_m = 1,25$  až  $1,60$ ,
- c) vynikající tvářitelnost  $r_m > 1,60$ .

Pro stanovení součinitelů plastické anizotropie plechu z oceli 11 305.21 byla provedena zkouška jednoosým tahem dle ČSN 42 0310 na zkušebním trhacím stroji INSTRON 1116 s přídatným zařízením SDT z MLR. Jako zkušební tyče byly použity části plechových tabulek, které zbyly po odstřížení zkušebních tyčí pro stanovení mechanických vlastností (viz obr. 2.3). Tím byly splněny požadavky pro odběr zkušebních vzorků dle ČSN 42 0305. Z plechové tabulky byly zhotoveny čtyři zkušební tyče. Na každé tyči byla počáteční délka  $L_0 = 80$  mm vyznačena ryskami s přesností 1 %. Počáteční šířka tyče  $b_0$  byla změřena na třech místech zkušební tyče s přesností 0,01 mm. Směrodatná počáteční šířka pak byla vypočtena jako aritmetický průměr z těchto tří měření. Zkušební tyče byly podrobeny zkoušce jednoosým tahem podle ČSN 42 0310, přičemž zatěžování probíhalo až do dosažení maximální rovnoměrné deformace (u ocelových plechů k tažení válcovaných za studena představuje 20 % hodnoty poměrného prodloužení). Po odlehčení byla v ose zkoušené tyče změřena konečná délka  $L_k$  s přesností 0,01 mm. Směrodatná konečná šířka zkoušené tyče  $b_k$  byla vypočítána jako aritmetický průměr ze tří měření na tyči.

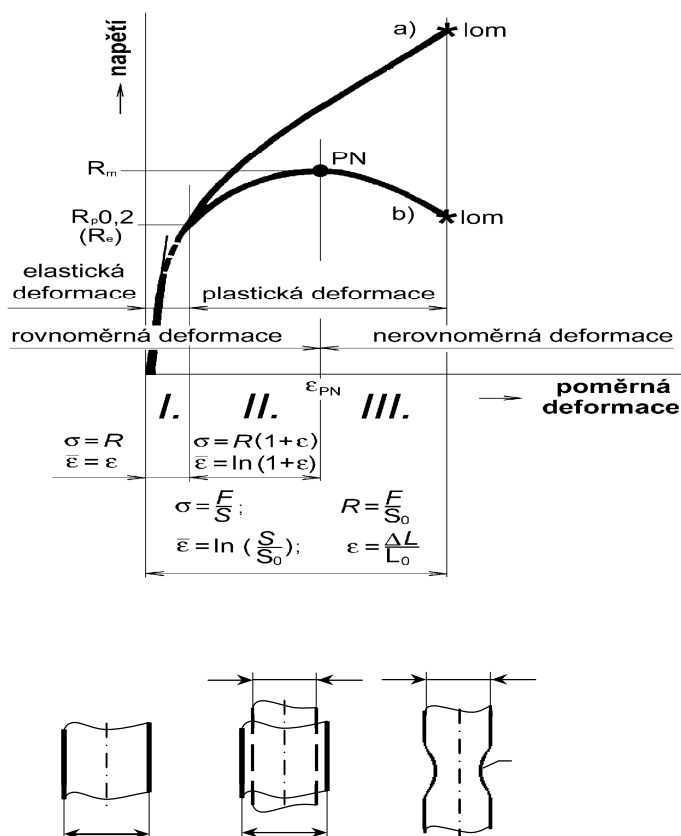
Hodnoty součinitelů plastické anizotropie byly vypočítány jako aritmetické průměry ze všech měření. Hodnoty součinitelů plastické anizotropie ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu, hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$  a stupně plošné anizotropie součinitele plastické anizotropie  $\Delta r$  byly vypočítány dle vztahů (2.9) až (2.11). Zjištěné hodnoty všech těchto součinitelů pro zkoušený plech z oceli 11 305.21 jsou uvedeny v tab. 2.9.

Tabulka 2.9 Hodnoty součinitelů normálové anizotropie a stupně plošné anizotropie součinitele normálové normálové anizotropie plechu

| $r_0$ [-] | $r_{45}$ [-] | $r_{90}$ [-] | $\bar{r}$ [-] | $\Delta r$ [-] |
|-----------|--------------|--------------|---------------|----------------|
| 1,50      | 1,10         | 1,65         | 1,34          | 0,238          |

## 2.6 Stanovení exponentů deformačního zpevnění

Základní charakteristikou technických materiálů je závislost mezi napětím a deformací, kterou získáme zpracováním výsledků zkoušky jednoosým tahem konstantní deformační rychlostí. Sleduje se při ní závislost působící síly  $F$  na prodloužení vzorku  $\Delta L$  (obr. 2.4).



Obrázek 2.4 Tvar zkušební tvče v I II a III

Exponent deformačního zpevnění vyjadřuje intenzitu zpevňování plechu při plastické deformaci jednoosým tahem. Číselně je roven exponentu v rovnici (2.12), matematicky vyjadřuje parabolicky aproximovanou závislost intenzity skutečných napětí na intenzitě skutečných deformací. Exponent zpevnění je materiálová konstanta, pro hlubokotažné plechy je vždy menší než 1 (obvykle mezi 0,1 – 0,3).

Závislost mezi intenzitou skutečných napětí  $\sigma_i$  a intenzitou skutečných deformací  $\varphi_i$  v oblasti plastických deformací u nízkouhlíkové oceli lze definovat exponenciální závislostí dle Ludwikova vztahu:

$$\sigma_i = C_x \cdot \varphi_i^{n_x} \quad [\text{MPa}] \quad (2.12)$$

kde je  $n_x$  exponent deformačního zpevnění ve směru  $x$  vůči směru válcování plechu,

$C_x$  součinitel pevnosti ve směru  $x$  vůči směru válcování plechu [MPa].

Hodnota exponentu deformačního zpevnění ocelového plechu závisí především na velikosti zrna, na chemickém složení, tj. na obsahu příměsových prvků, na stupni hladicího válcování a na stárnutí [1]. Všechny příměsové prvky snižují exponent deformačního zpevnění.

Metoda měření dle ČSN ISO 10275 používá ploché zkušební tyče neodstupňované. Jako kritérium tvářitelnosti plechu se používá průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  podle vztahu:

$$n_m = \frac{1}{4} \cdot (n_0 + 2 \cdot n_{45} + n_{90}) \quad [-] \quad (2.13)$$

$n_0, n_{45}, n_{90}$  jsou exponenty deformačního zpevnění ve směrech  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  vůči směru válcování plechu.

Stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění  $\Delta n$  se vypočítá podle vztahu:

$$\Delta n = \frac{1}{2} \cdot (n_0 - 2 \cdot n_{45} + n_{90}) \quad [-] \quad (2.14)$$

Exponent deformačního zpevnění ve směru  $x$  vůči směru válcování plechu pro jeden bod měřeného intervalu se u metody měření pro odstupňovanou zkušební tyč vypočítá ze vztahu [1]:

$$n_{xi} = \frac{\ln \frac{b_2 \cdot L_1}{b_1 \cdot L_2}}{\ln \frac{L_1}{L_2}} \quad [-] \quad (2.15)$$

kde jsou  $L_1, L_2$  počáteční měřená délka užší (širší) části zkušební tyče,

$L_1', L_2'$  okamžitá měřená délka užší (širší) části zkušební tyče  
po okamžitém zatížení,

$b_1, b_2$  počáteční šířka užší (širší) části zkušební tyče.

Exponent deformačního zpevnění ve směru  $x$  vůči směru válcování plechu se vypočítá jako průměrná hodnota pro celý interval měření závislosti „okamžité zatížení  $F$  – okamžité prodloužení  $\Delta L$ “, rozděleného na  $k$  úseků, podle vztahu [1]:

$$n_x = \frac{\sum_{i=1}^k n_{xi}}{k} \quad [-] \quad (2.16)$$

Vysoká hodnota průměrného exponentu deformačního zpevnění, tj. velká rychlost deformačního zpevnění plechu, způsobuje rovnoměrnější rozložení deformací při dvojosé tahové napjatosti, a tím přispívá k dosažení větší hodnoty celkové deformace. Čím vyšší je hodnota exponentu deformačního zpevnění, tím je plech vhodnější pro hluboké tažení.

Směrodatné hodnoty průměrného exponentu deformačního zpevnění  $n_m$  pro hodnocení tvářitelnosti plechů nejsou dosud stanoveny normou. Zatím lze použít návrh zatřídění plechů podle literatury [1]:

- a) nízká tvářitelnost  $n_m < 0,215$
- b) dobrá tvářitelnost  $n_m = 0,215$  až  $0,250$
- c) vynikající tvářitelnost  $n_m > 0,250$

Stanovení exponentů deformačního zpevnění plechů z oceli 11 305.21 byla provedena zkouška jednoosým tahem dle ČSN 42 0310 na zkušebním trhacím stroji INSTRON 1116 s přídatným zařízením SDT z MLR. Pro zhotovení zkušebních tyčí s rozměry v souladu s ČSN 42 0446 byly využity části plechových tabulek, které zbyly po odstřížení zkušebních tyčí pro předchozí zkoušky. Tím byly splněny požadavky ČSN 42 0305 pro odběr zkušebních vzorků.

Z plechové tabulky byly zhotoveny dvě zkušební tyče. Na každé tyči byla počáteční délka  $L_0 = 80$  mm vyznačena ryskami s přesností 1 %. Počáteční šířka tyče  $b_0$  byla změřena na třech místech zkušební tyče s přesností 0,01 mm. Směrodatná počáteční šířka pak byla vypočtena jako aritmetický průměr z těchto tří měření. Stejným způsobem byla stanovena směrodatná počáteční tloušťka tyče  $a_0$ .

Zkušební tyče byly podrobeny zkoušce jednoosým tahem podle ČSN 42 0310, přičemž zatěžování probíhalo až do přetržení tyče. V diagramu “ $F - \Delta L$ ” každé tahové zkoušky bylo určeno grafickou metodou podle ČSN 42 0436 šest dvojic hodnot okamžitého zatížení  $F$  a okamžitého trvalého prodloužení po odlehčení  $\Delta L$ . Hodnoty exponentů deformačního zpevnění ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vůči směru válcování plechu, průměrné hodnoty exponentů deformačního zpevnění  $n_m$  a stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění  $\Delta n$  byly vypočítány dle vztahů (2.13) až (2.15). Spočítané hodnoty exponentů pro zkoušený plech 11 305.21 jsou uvedeny v tab. 2.9.

Tabulka 2.9 Hodnoty exponentů deformačního zpevnění a stupně plošné anizotropie součinitele normálové anizotropie plechu

| $n_0$ [-] | $n_{45}$ [-] | $n_{90}$ [-] | $n_m$ [-] | $\Delta n$ [-] |
|-----------|--------------|--------------|-----------|----------------|
| 0,220     | 0,210        | 0,213        | 0,264     | 0,005          |

### 3 Návrh tvaru zadané součásti při dodržení technologičnosti konstrukce

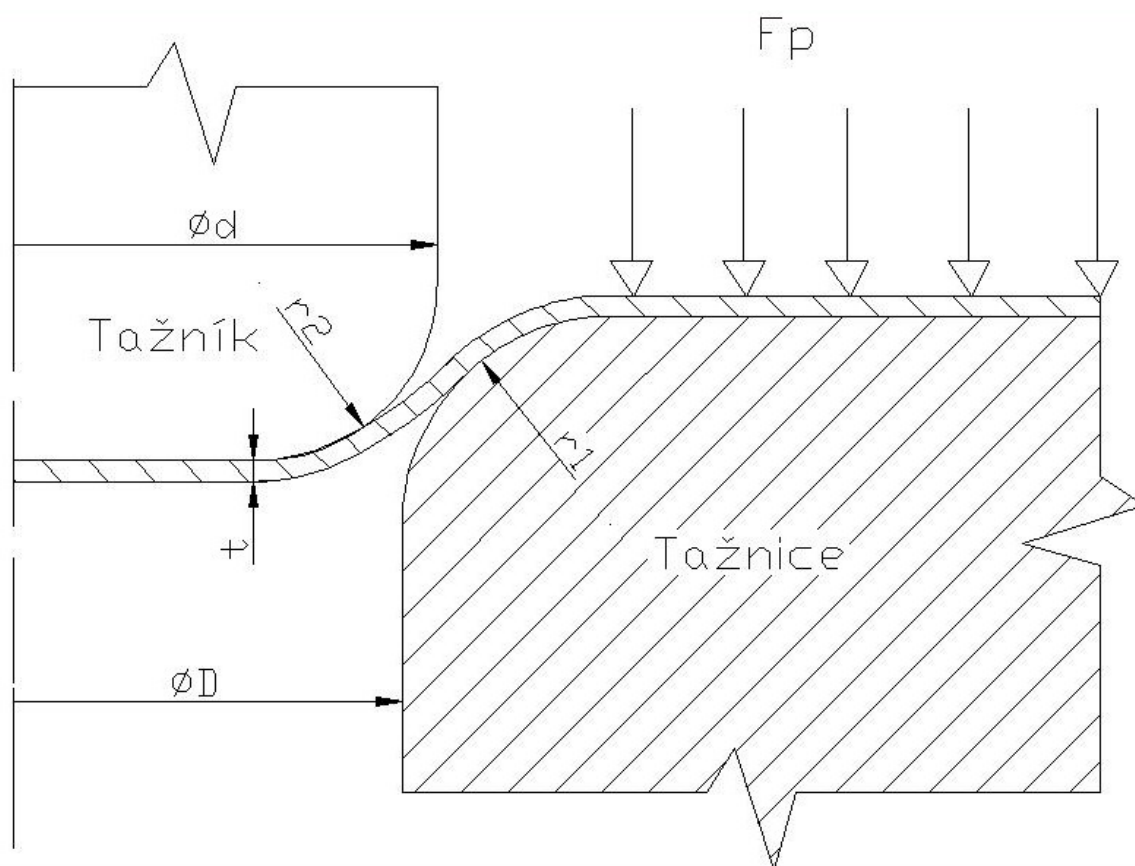
Návrh nejmenšího možného zaoblení nástrojů  $r_{\min}$  při tažení krytu posuvných dveří.

Poloměr hran, zejména tažnice, značně ovlivňuje proces hlubokého tažení, např. pro 1. či 2. tah je optimální hodnota  $r_{\text{opt.}} = (6 \div 10) \cdot t$  dle ČSN 22 7303. Vyšší hodnoty vedou ke zvlnění, přidržovač ztrácí svoji funkci, zatím co malé hodnoty  $r_{\text{opt.}}$  zvyšují tažnou sílu a vzniká nebezpečí utržení dna. Poloměr tažníku pro první operace bývá shodný s poloměrem tažnice.

V počátečních fázích, při velkém stupni deformace, dosahují radiální napětí volného úseku příruby maximální hodnoty. Je možné je snížit zmenšením poloměrů zaoblení obou nástrojů, viz obrázek 3.1.

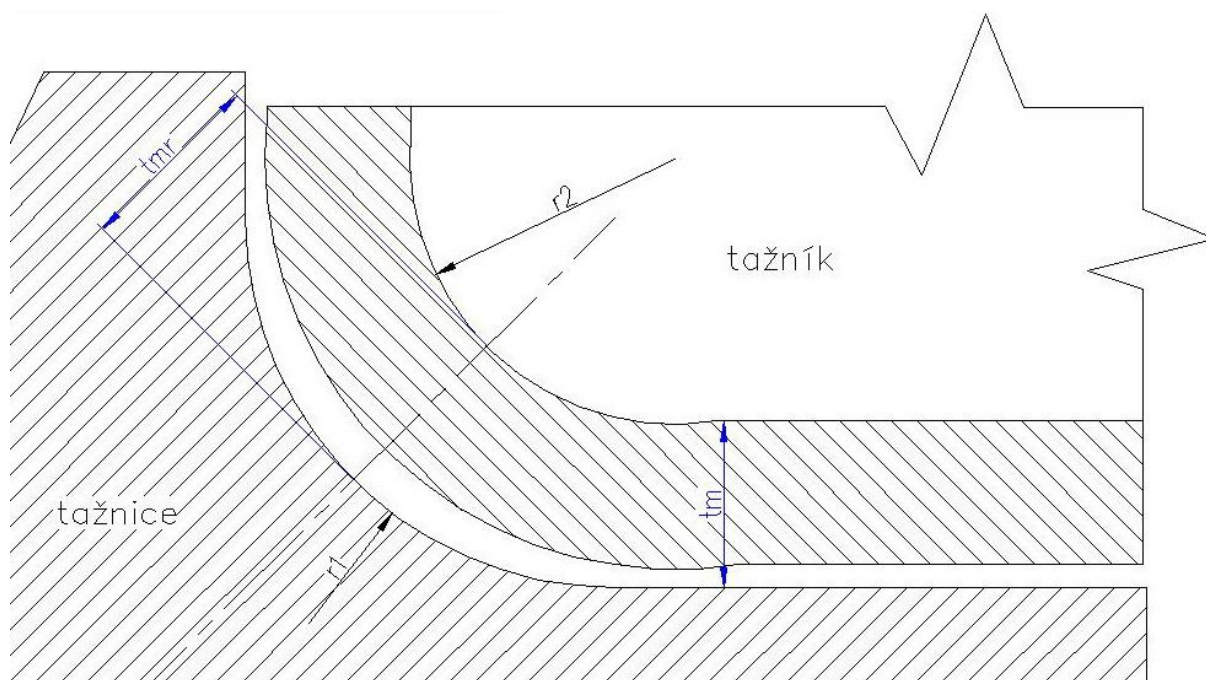
Dle následného vztahu lze spočítat minimální zaoblení tažnice:

$$r_{1\min} = 0,05 \cdot [50 + (D - d)] \cdot \sqrt{t} \quad [-] \quad (3.1)$$



Obrázek 3.1 Zaoblení nástrojů

Po dosazení do vztahu 3.1 bylo zjištěno nejmenší možné zaoblení tažnice  $r_m = 2,55$  mm. Nejmenší možné zaoblení tažníku lze zjistit pomocí velikosti tažné mezery. Mezera mezi tažníkem a tažnicí se vytváří pro zmenšení tření mezi tažnicí a plechem, viz obrázek 3.2.



Obrázek 3.2 Nákres tažné mezery

Tažná mezera se podle ČSN 22 7303 volí dle vztahů :

– v podélných částech výtažku  $t_m = (1,15 \text{ až } 1,30) \cdot t \text{ [mm]}$  (3.2)

– v rozích výtažku  $t_{mr} = (1,30 \text{ až } 1,40) \cdot t \text{ [mm]}$  (3.3)

Protože zadaná součást (kryt posuvných dveří) patří svými rozměry (příloha A1) mezi malé výtažky, byly použity nejmenší možné hodnoty pro tažnou mezeru.

– v podélných částech výtažku  $t_m = 1,15 \cdot t = 1,15 \cdot 1 = 1,15 \text{ mm}$

– v rozích výtažku  $t_{mr} = 1,30 \cdot t = 1,30 \cdot 1 = 1,30 \text{ mm}$

Určené velikosti tažných mezer nám poslouží k zjištění nejmenšího zaoblení tažníku. Dle obrázku 3.2 bylo v programu AutoCAD přesně narysováno zaoblení tažníku viz příloha B1. Nejmenší možné zaoblení pro tažnici je  $r_1 = 2,55$  mm, pro tažník je  $r_2 = 1,83$  mm.



## 4 Tvar a velikost přístřihu

Optimální tvar a velikost přístřihu se stanovují následujícími metodami:

- a) dle ČSN
- b) metodou využívající BSE modul v programu DYNAFORM 5.2.
- c) metodou řezů
- d) metodou využívající trajektorií maximálních smykových napětí (TMSN)

### 4.1 Konstrukce přístřihu posuvných dveří dle ČSN 22 7303

Při určování velikosti a tvaru přístřihu rotačně symetrických výtažků se určuje přístřih podle ČSN 22 7301. Tato metoda vychází z předpokladu, že tloušťka stěn výtažků se vzhledem ke dnu při procesu tažení nemění. Jde o zachování objemu (stejný objem přístřihu i výtažku). Z důvodu anizotropie se velikost přístřihu zvětšuje o 5 až 7 %.

Pro tažení dutých čtyřhranných výtažků se velikost a tvar přístřihu stanovuje dle ČSN 22 7303. Opět vychází z předpokladu, že tloušťka stěn výtažku se během tažení nemění, takže plocha přístřihu se rovná ploše výtažku. Musí se ovšem zohlednit anizotropie mechanických vlastností plechu. Z tohoto důvodu je pro zajištění zadaných rozměrů výtažku nutné zvětšit výšku výtažku o technologický přídavek na ostřížení. Ten se volí podle velikosti výtažku a ostříhovacího zařízení v rozmezí 2 mm ÷ 20 mm.

Tvar a velikost přístřihu pro duté čtyřhranné výtažky je na obr. 4.1.

Vztahy potřebné pro výpočet:

Poloměr přístřihu v rohu výtažku (je-li  $\frac{d_r}{2} > r_d$ ):

$$r_0 = \sqrt{0,25 \cdot d_r^2 + d_r \cdot (h_d + 0,57 \cdot r_d) - 0,14 \cdot r_d^2} \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

kde  $r_0$  je poloměr přístřihu v místě zaoblených bočních stěn,

$d_r$  je průměr zaoblení bočních stěn výtažku,

$h_d$  je výška rovinné části boční stěny výtažku,

$r_d$  je poloměr zaoblení mezi dnem a boční stěnou výtažku.

Rozvinutá výška v podélných stěnách výtažku:

$$h_s = 0,57 \cdot r_d + h_d + 0,5 \cdot d_r \quad [\text{mm}] \quad (4.2)$$

Vypočtené hodnoty se upravují na redukovaný poloměr přístřihu  $R_0$ :

$$R_0 = x \cdot r_0 \quad [\text{mm}] \quad (4.3)$$

kde je  $x$  koeficient zvětšení poloměru  $r_0$ .

Koeficient  $x$  se stanoví dle vzorce:

$$x = 0,074 \cdot \left( \frac{r_0}{d_r} \right) + 0,982 \quad [-] \quad (4.4)$$

Zmenšení rozvinuté výšky delší strany:

$$h_{sa} = y \cdot \frac{r_0^2}{a_{rd}} \quad [\text{mm}] \quad (4.5)$$

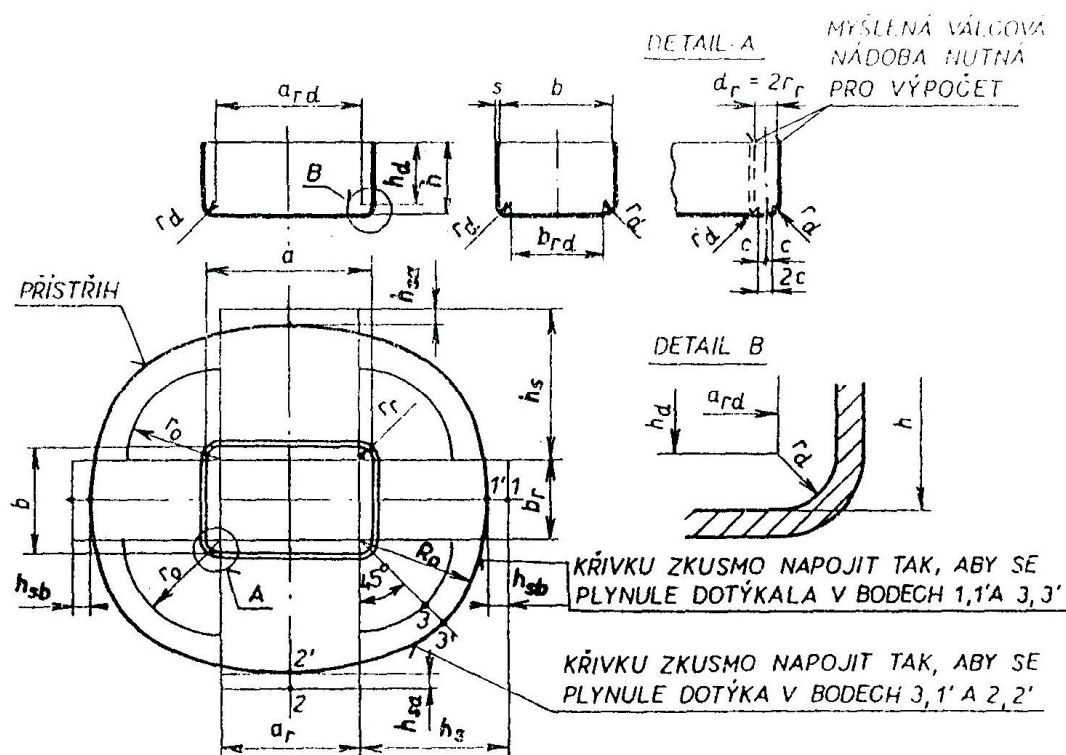
kde je  $y$  koeficient zmenšení výšky  $h_{sa}$ ,

$a_{rd}$  vzdálenost středů zaoblení  $r_d$  odpovídající straně  $a$  konečného tvaru výtažku.

Vztah pro výpočet koeficientu  $y$ :

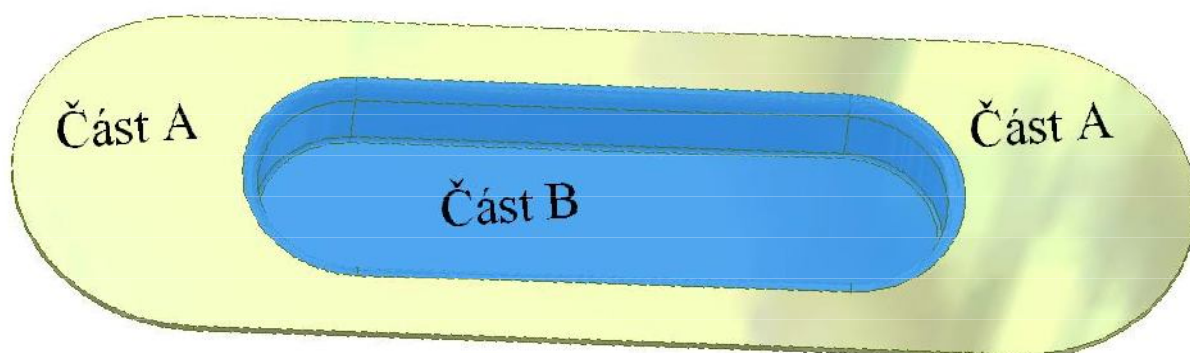
$$y = \frac{\pi}{4} \cdot (x^2 - 1) \quad [-] \quad (4.6)$$

Tvar a velikost přístřihu pro duté čtyřhranné výtažky je na obr. 4.1.



Obrázek 4.1 Velikost přístřihu pro duté čtyřhranné výtažky

Vzhledem ke tvaru zadané součásti jsem navrhl rozdělit zadaný výrobek z plechu na dvě části (část A, část B) viz obrázek č. 4.2. Vzhledem k tomu že část A nepodléhá žádné tvarové změně, není potřeba pro ni tvořit přístřih.



Obrázek 4.2 Rozdělení výtažku na jednotlivé části (A-nepodléhá tvarové změně, B-podléhá tvarové změně).

Parametry pro výpočet rozměru přístřihu v úseku B:

( $d_{rB} = 26 \text{ mm}$ ;  $h_{dB} = 8,5 \text{ mm}$ ;  $r_{dB} = 0,5 \text{ mm}$ ):

Poloměr přístřihu v části B:

$$r_B = \sqrt{0,25 \cdot d_{rB}^2 + d_{rB} \cdot (h_{dB} + 0,57 \cdot r_{dB}) - 0,14 \cdot r_{dB}^2}$$

$$r_B = \sqrt{0,25 \cdot 26^2 + 26 \cdot (8,5 + 0,57 \cdot 0,5) - 0,14 \cdot 0,5^2} = 19,94 \text{ mm}$$

Rozvinutá výška v podélných stěnách výtažku:

$$h_s = 0,57 \cdot r_d + h_d + 0,5 \cdot d_r$$

$$h_s = 0,57 \cdot 0,5 + 8,5 + 0,5 \cdot 26 = 24,35 \text{ mm}$$

Koeficient  $x_B$ :

$$x_B = 0,074 \cdot \left( \frac{r_B}{d_{rB}} \right)^2 + 0,982$$

$$x_B = 0,074 \cdot \left( \frac{19,94}{26} \right)^2 + 0,982 = \underline{1,038735}$$

Redukovaný poloměr přístřihu v části B:

$$R_{B'} = x_B \cdot r_B = 20,71 \doteq 21 \text{ mm}$$

U všech vypočítaných rozměrů přístřihu je nutné zohlednit anizotropii mechanických vlastností materiálu. Z tohoto důvodu jsou výše uvedené stanovené rozměry přístřihu zvětšeny o 5 %. Pro zajištění rozměrů výtažku je připočten technologický přídavek na ostřížení tvaru o velikosti 5 mm. Konstrukce je v příloze C1 a výkres naleznete v příloze C2.

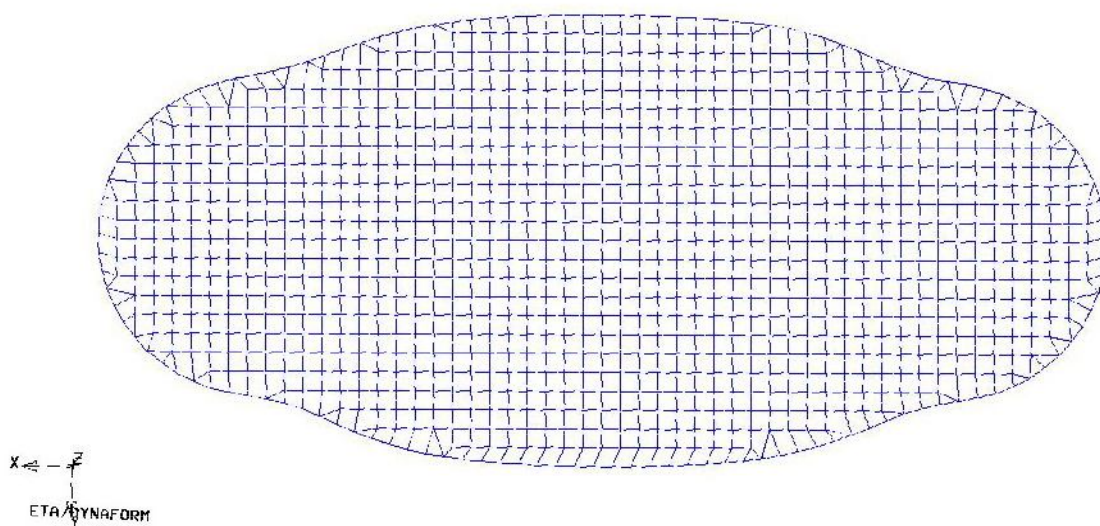
## **4.2 Konstrukce přístřihu posuvných dveří v programu DYNAFORM 5.2**

Konstrukce přístřihu metodou využívající BSE modul byla provedena v programu DYNAFORM 5.2. Pro vygenerování přístřihu je nutné znát model konečného výtažku s přídavky na ostřížení, který se do programu importuje. Podle něj se v příkazu „BSE Preparation“ v nabídce „Blank Size Estimate“ vytvoří hraniční čára („Boundary Line“), která bude tvořit obrys přístřihu. V této nabídce je také nutno zvolit materiál, ze kterého bude vyroben budoucí přístřih a tloušťku plechu.

Zadané hodnoty: materiál DC04 (11 305.21),

tloušťka plechu 1,0 mm.

Aby bylo možné s takto vytvořeným obrysem přístřihu dále pracovat, musí se vytvořit mřížka elementů. Pomocí příkazu „Blank Generator“ v nabídce nástrojů „Tools“, umístěné v panelu nabídek programu Dynaform, byla na model přístřihu dle obrysu přístřihu tvořící hraniční čáru (boundary line) vygenerována síť konečných prvků, která tvořila skořepinu modelu přístřihu. Zadaná hodnota míry sepětí konečných prvků s modelem (tools radii) byla 0.5. Na zvolené velikosti elementů závisí přesnost konečného výpočtu a tedy přesnost výsledků řešení. Proto se volí spíše větší počet menších elementů. Ovšem při zadávání velkého počtu elementů se musí počítat s tím, že bude konečný výpočet trvat déle. Nakonec byla na vytvořené síti konečných prvků provedena kontrola směru normál jednotlivých konečných prvků (Auto plate normal), kontrola překrytí konečných prvků (Overlap element) a kontrola spojitosti sítě konečných prvků (Display model boundary) nacházející se v nabídce Model check modulu Preprocess a upravený model přístřihu byl uložen do souboru s příponou .stl. S takto připraveným přístřihem (obr. 4.3) je možno provádět simulaci procesu tažení. Přístřih vygenerovaný pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 je v příloze C3.



Obr. 4.3 Model přístřihu krytu posuvných dveří vygenerovaného programem DYNAFORM 5.2 se sítí konečných prvků.

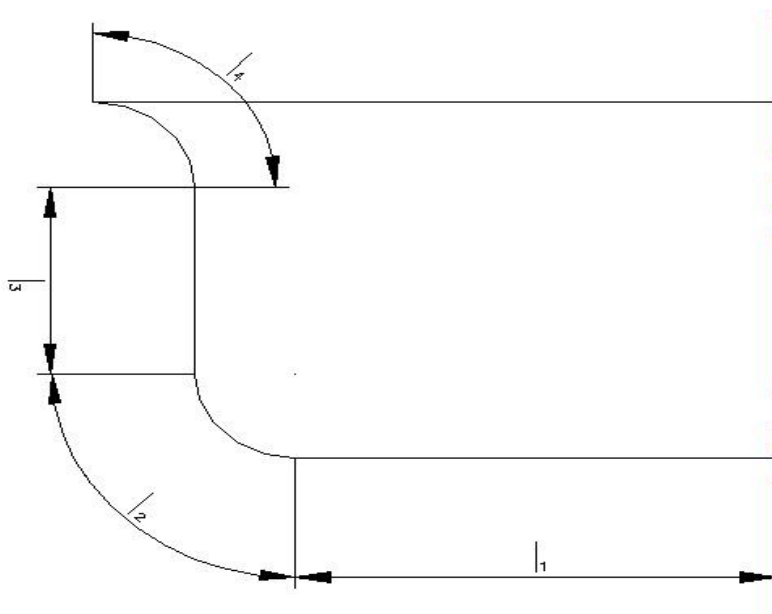
### 4.3 Konstrukce přístřihu krytu posuvných dveří metodou řezů

Tato metoda se používá pro zjištění tvaru a velikosti přístřihu výtažků libovolného tvaru. Je vhodná převážně pro velkorozměrné výtažky a pro výtažky s členitou plochou tažníku. Je zde předpoklad že zadaný výtažek se bude táhnout se ztenčením stěny [2].

Výtažek krytu posuvných dveří byl opět rozdělen na dvě části (viz obr. 4.2), část A opět nepodléhá žádné tvarové změně, proto ji pouze přičteme. Při stanovení tvaru a velikosti přístřihu metodou řezů je důležité správně zvolit polohu řezů. Na výtažku krytu posuvných dveří bylo provedeno 9 řezů a označeny čísla 1 až 9. Všechny myšlené řezy mají stejný počátek v těžišti výtažku viz příloha C4. Řezy 1 až 3 jsou vůči sobě pod úhlem  $30^\circ$ , řezy 3 až 7 pod úhlem  $15^\circ$ . Zbytek řezů 7 až 9 je proveden opět pod úhlem  $30^\circ$ .

Při tažení vzniká v různých místech výtažku různý stav napjatosti a tudíž různé protažení plechu, proto jsou délky jednotlivých povrchových křivek rozděleny do úseků (viz obrázek 4.4). K jednotlivým úsekům jsou přiřazeny koeficienty pro tažení  $k_1$  až  $k_4$ .

- dno výtažku  $k_1 = 0,89$
- spodní zaoblení  $k_2 = 0,77$
- stěna výtažku  $k_3 = 0,89$
- horní zaoblení  $k_4 = 0,78$



Obrázek 4.4 Označení úseků povrchových křivek

Délky povrchových křivek jednotlivých řezů se skládají z jednotlivých úseků,  $l_1$  je délka dna výtažku od středu poloměru zaoblení,  $l_2$  je délka spodního zaoblení,  $l_3$  je délka horní stěny výtažku,  $l_4$  je délka horního zaoblení.

Obecný vztah pro výpočet délky povrchové křivky  $l_i$  od středu poloměru rohu dna pro všechny řezy je:

$$l_i = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \quad [\text{mm}] \quad (4.7)$$

tento výraz byl upraven koeficientem pro tažení  $k$ , pro přepočet potom bude:

$$l_k = l_1 \cdot k_1 + l_2 \cdot k_2 + l_3 \cdot k_3 + l_4 \cdot k_4 \quad [\text{mm}] \quad (4.8)$$

Vypočtené délky povrchových křivek jsou v tab. 4.1. Přístřih sestrojený metodou řezů je v příloze C5



Tabulka 4.1 Délky povrchových křivek ve všech řezech

| Číslo řezu | Délky jednotlivých úseků povrchové křivky (mm) |       |       |       | Délka povrchové křivky $l_i$ a délka upravená koeficienty $l_k$ (mm) |       |
|------------|--|-------|-------|-------|--|-------|
|            | $l_1$  | $l_2$ | $l_3$ | $l_4$ | $l_i$  | $l_k$ |
| 1          | 11,50  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 23,93  | 20,85 |
| 2          | 13,24  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 25,67  | 22,38 |
| 3          | 23,00  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 35,43  | 31,08 |
| 4          | 37,46  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 49,89  | 43,95 |
| 5          | 41,50  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 53,93  | 47,55 |
| 6          | 37,46  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 49,89  | 43,95 |
| 7          | 23,00  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 35,43  | 31,08 |
| 8          | 13,24  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 25,67  | 22,38 |
| 9          | 11,50  | 1,57  | 8,50  | 2,36  | 23,93  | 20,85 |

#### 4.4 Konstrukce přístřihu krytu posuvných dveří metodou TMSN

Konstrukce tvaru a velikosti přístřihu pro výtažek krytu posuvných dveří je v příloze C6. U zadaného výtažku obrys oblasti kontaktu tažníku s přístřihem na počátku tažení odpovídá obrysu tažné hrany tažnice, zmenšenému o poloviční tloušťku plechu (vytvoření střednicové plochy). Oblast kontaktu tažníku s přístřihem se v průběhu procesu tažení vlivem tření mezi tažníkem a plechem přemísťuje rychlostí rovnou pohybu tažníku. Nad částmi obrysu tažné hrany tažnice byla sestrojena pole sítě TMSN s využitím programu AutoCAD.

Na vnitřním obrysu sítě TMSN jsou smyková napětí rovna nule, proto je TMSN protínají pod úhlem  $\pm 45^\circ$ , aby nevznikla při tažení na obrysu přístřihu smyková napětí, která zapříčiňují vznik vln.

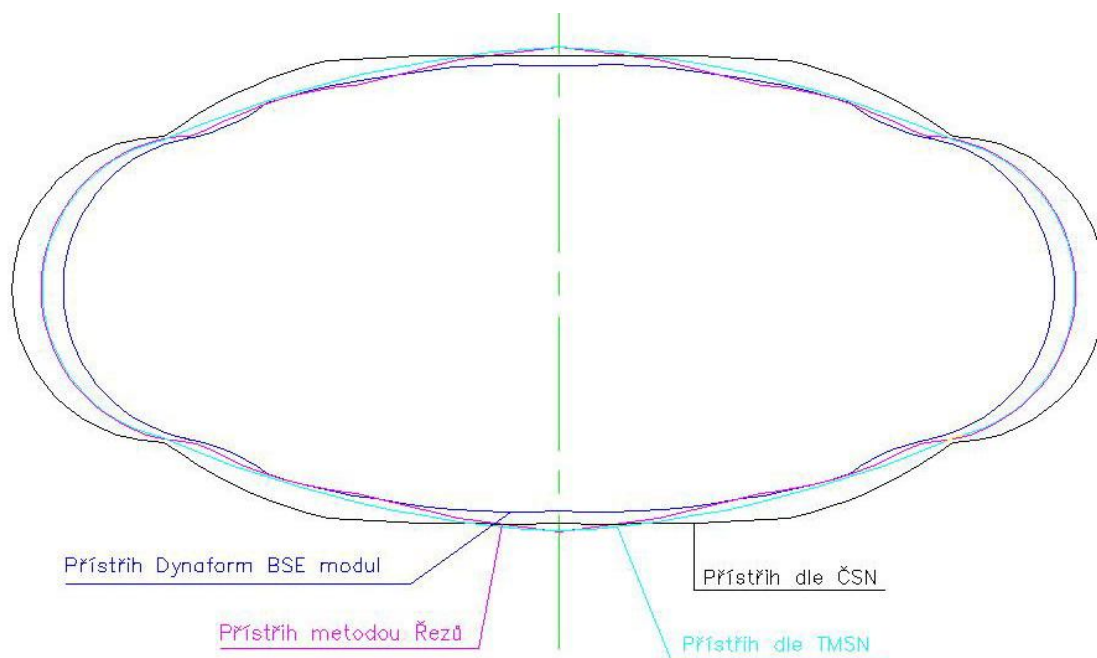
Výkres přístřihu krytu posuvných dveří, stanoveného metodou trajektorií maximálních smykových napětí, je v příloze C7.

#### 4.5 Vzájemné porovnání přístřihů krytu posuvných dveří

Grafické porovnání přístřihů krytu posuvných dveří je na obr. 4.5. Přístřihy rýsované v programu AutoCAD (přístřih dle ČSN, přístřih dle metody řezů a přístřih dle trajektorií maximálních smykových napětí) jsou také k porovnání na výkrese v příloze C8. Po stránce ekonomické je na tom nejlépe přístřih dle BSE modulu v programu Dynaform 5.2. Porovnání ploch všech použitých přístřihů je v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2 Plochy přístřihů pro kryt posuvných dveří

| Přístřihy   | Plocha přístřihu<br>$S$ [mm <sup>2</sup> ] |
|-------------|--|
| ČSN         | 17 907,85                                  |
| BSE modul   | 15 249,89                                  |
| Metoda řezů | 16 112,94                                  |
| TMSN        | 16 363,62                                  |



Obrázek 4.5 Grafické porovnání přístřihů pro kryt posuvných dveří

## **5 Simulace procesu tažení krytu zápusných dveří s využitím software**

Novým trendem firem zabývajících se tvářením plechů je využívání počítačů k numerické simulaci procesu tváření. Simulační software se používá v přípravě výroby při návrhu a optimalizaci lisovaných součástí a nástrojů. Existuje mnoho programů na bázi metody konečných prvků jak v objemovém tváření (SuperForge, QForm, SuperForm aj.), tak i při tváření plechů (Dynaform). Nespornou výhodou simulace je fakt, že lze nastavit a vyzkoušet různé parametry tvářecích nástrojů pro různé typy výrobků, bez nutnosti zhotovovat drahé nástroje či prototypy.[4]

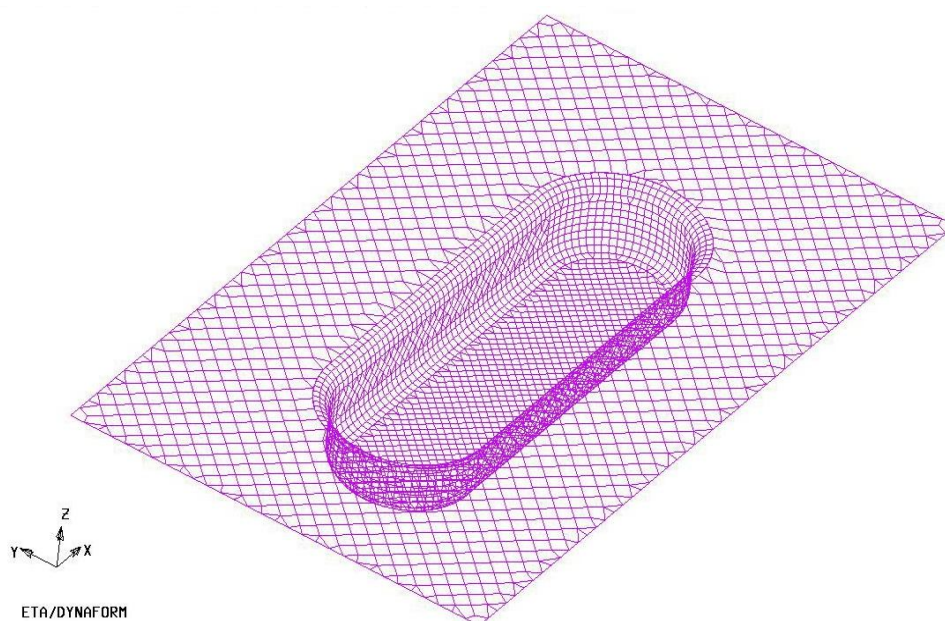
K simulaci procesu tažení výtažku levého krytu ventilátoru byl použit program DYNAFORM 5.2, vyvinutý v americké společnosti Engineering Technology Associates, Inc. (ETA). Obsahuje CAD translátory, proto se s jeho produkty dá pracovat ve většině CAD softwarů mezi které například patří CATIA V4, CATIA V5, SolidWorks, aj. Dynaform 5.2 se skládá z několika modulů, které slouží pro tvorbu a úpravu importovaných modelů a pro zpracování výsledků. Pro tvorbu ploch, čar, generování elementů a jejich kontrolu lze použít modul „Preprocess“. Pro návrh a tvorbu nástrojů je zde „DFE modul“, pro stanovení tvaru přístřihu „BSE modul“. Uložená data s příponou df, vytvořená pomocí těchto modulů, se poté zpracovávají v řešiči (Solver LS DYNA). Pro výslednou simulaci je používán ETA/Post-Processor, kde si můžeme zobrazit celou simulaci a projít všechny její kroky.

### **5.1 Tvorba nástrojů v programu DYNAFORM 5.2**

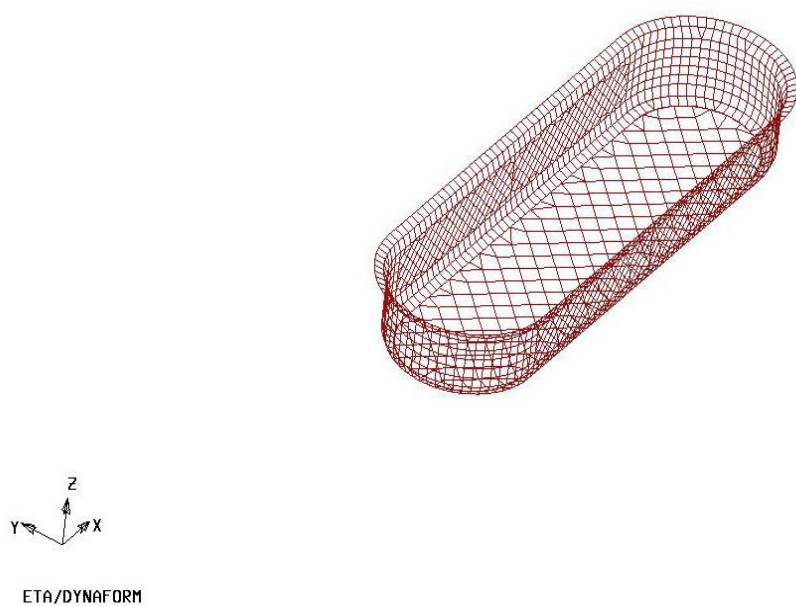
Pro simulaci v programu Dynaform byl nejdříve vytvořen model výtažku v CAD programu CATIA. Tento model byl uložen jako soubor .iges a poté importován do programu Dynaform. Model uložený jako ges obsahuje pouze čáry (lines) a povrchy (surfaces), síť elementů (elements), která je potřebná pro výpočet, se musela vytvořit.

U importovaného modelu se nejprve musely vytvořit elementy. Síť elementů se dá vytvořit více způsoby. Jedna možnost je v modulu „Preprocess“ vybrat záložku „Element“ a v té „Surface Mesh“. U tohoto modelu však byla použita jiná metoda, v modulu „Tools“ záložka „Blank Generator“ v nabídnutém okně se volí velikost elementů (0.5).

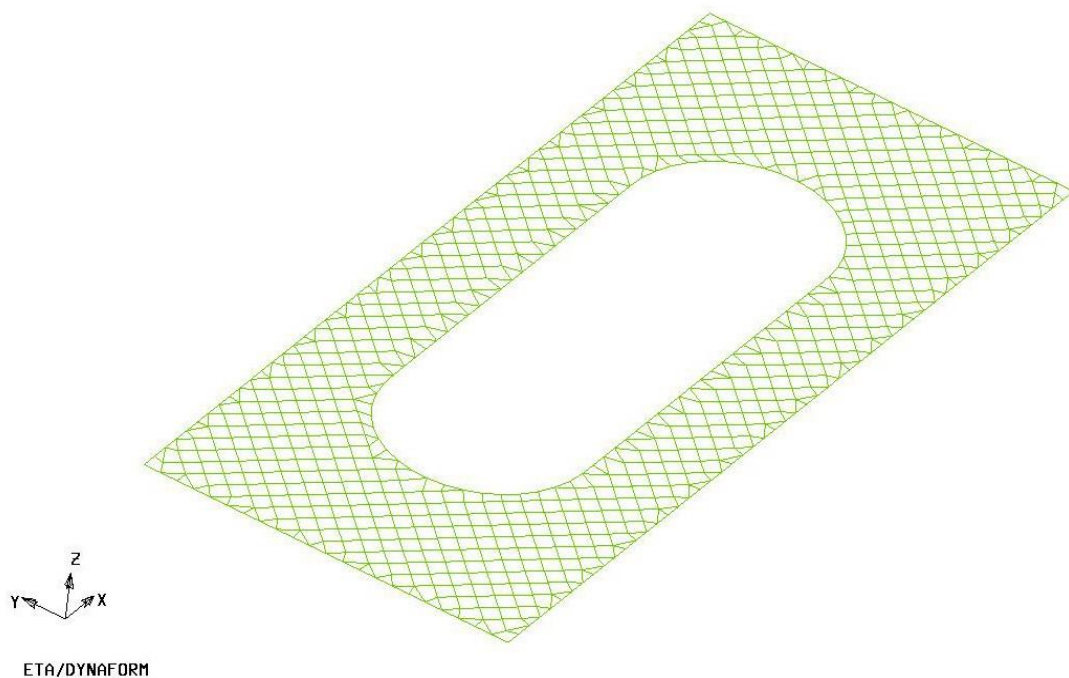
Takto sesítovaný model byl dále upravován a to tak že byl zbaven přebytečných povrchů (surfaces) a čar (lines), protože model vytvořený v CATII má stanovenou tloušťku, ale Dynaform pro svůj výpočet potřebuje model sestavený pouze ze střednicových ploch. Model byl pojmenován jako DIE (tažnice) viz obrázek 5.1. Z modelu tažnice lze vytvořit pomocí modulu „Preprocesor“ kopii zmenšenou o tloušťku materiálu, v tomto případě kvůli malým rozměrům nástroje se nepodařilo vytvořit funkcí „offset“ model tažníku. Proto musel být opět vytvořen model v CATII, uložen s koncovkou iges a zpracován obdobně jako tažnice. Byl pojmenován PUNCH (tažník) viz obrázek 5.2. Stejným postupem se vytvořil přidržovač, byl pojmenován BINDER (obr. 5.3). Na všech nástrojích byla provedena kontrola směru normál jednotlivých elementů („Auto plate normal“), které musí mít u všech elementů stejný směr, kontrola překrývajících se elementů („Overlap element“) a kontrola spojitosti sítě („Display model boundary“). Všechny tyto možnosti kontroly se nacházející v nabídce „Model check“ v modulu „Preprocess“. Celá sestava byla uložena do souboru .df. Všechny tyto nástroje stejně jako přístřihy byly umístěny při modelování v CATII do kladných souřadnic ( $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 0$ ) abychom při importování do Dynaformu nemuseli dané součásti složitě polohovat.



Obr. 5.1 Síť elementů tažnice krytu posuvných dveří



Obr. 5.2 Síť elementů tažníku krytu posuvných dveří

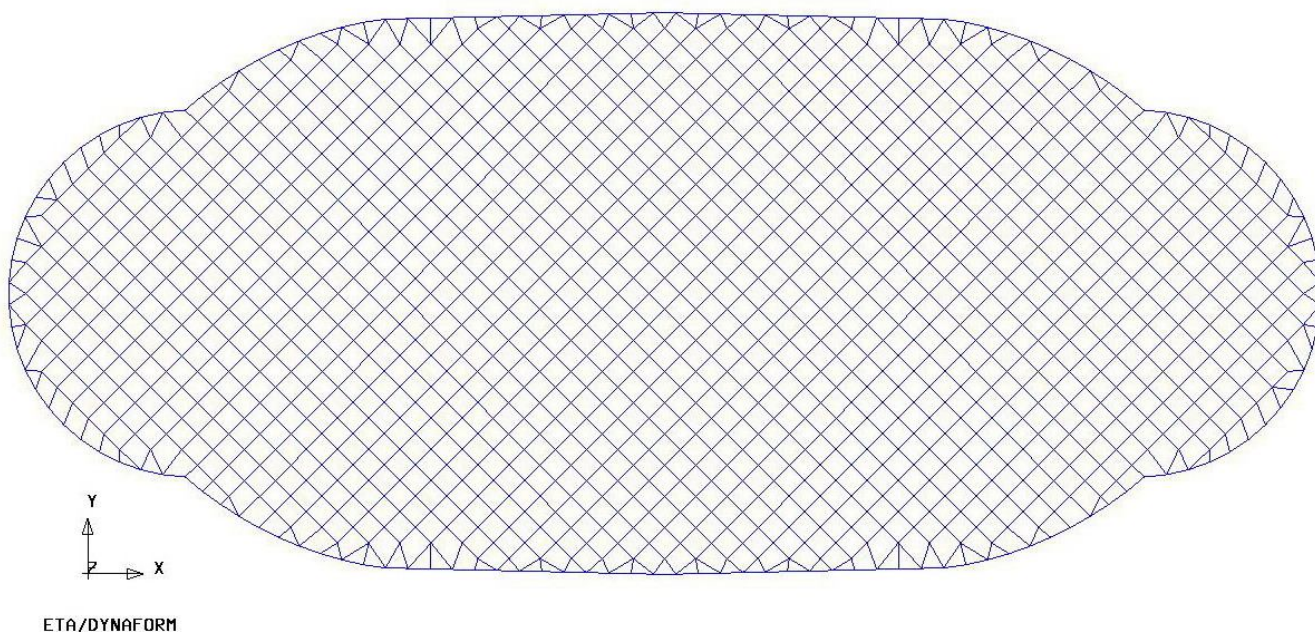


Obr. 5.3 Síť elementů přídržovače



### 5.1.1 Úprava přístřihů v programu DYNAFORM 5.2

Model přístřihu byl vytvořen v CAD programu CATIA jako soubor iges a následně importován do Dynaformu. Každý model byl vytvořen pouze z čar (lines) a povrchů (surfaces), síť elementů se musela vytvořit v modulu „Preprocess“ v záložce „Element“. Velikost elementů byla zvolena 0.5. U přístřihů se tato velikost volí co nejmenší, protože má vliv na přesnost a kvalitu výpočtu, ale zároveň příliš malá velikost elementů výrazně prodlužuje výpočet. Opět byly odstraněny přebytečné povrchy (surface) a čáry (lines), aby vznikla plocha s nulovou tloušťkou. Finálně byla na vytvořených elementech provedena kontrola směru normál jednotlivých elementů („Auto plate normal“), kontrola překrývajících se elementů („Overlap element“) a spojitosti sítě („Display model boundary“). Takto byly upraveny všechny přístřihy.



Obr. 5.4 Síť elementů přístřihu vytvořeného dle ČSN 22 7303

## 5.2 Definování okrajových a pracovních podmínek v programu Dynaform

K simulaci procesu tažení je nutné mít vytvořeny nástroje a také se musí definovat všechny potřebné okrajové podmínky, bez kterých simulaci nelze provést. Mezi tyto podmínky patří např. materiál přístřihů, tvar a rozměr přístřihu, dráha nástrojů, síla přidržovače, rychlost tažníku aj. Nastavení a nadefinování všech okrajových podmínek procesu tváření bylo provedeno v nabídce nástrojů (Tools) obsažené v panelu nabídek programu Dynaform.

Po načtení souboru s příponou .df obsahující nástroje a přidání souboru s příponou .iges obsahující model přístřihu bylo v modulu „Tools” nabídka „Analysis setup” provedeno základní nastavení vstupní analýzy.

Nastavené parametry v nabídce „Analysis Setup“:

|   |   |
|---|---|
| Jednotky („Units“):                     | MM, TON, SEC, N (standardní nastavení jednotek v Dynaformu) |
| Typ tažení („Draw type“):               | Double Action   |
| Kontaktní plocha („Contact Interface“): | Form One Way S. to S. (povrch nástrojů)                     |
| Směr zdvihu („Stroke Direction“):       | Z   |
| Tažná mezera („Contact Gap“):           | 1,0 mm  |

Musíme zvolit typ tažení „Double Action”. V základu má dynaform nastaven „Single Action”, který představuje převrácený tah. Pohybuje se tažnice a přidržovač namísto tažníku.

## 5.3 Definování nástrojů a přístřihů v programu Dynaform

V nabídce „Define Tools“ se přiřadí jednotlivé modely k již předvoleným nástrojům (DIE, PUNCH, BINDER). Protože má Dynaform v nastavení obrácený tah, musí se k předvolenému nástroji DIE přiřadit model PUNCH a k předvolenému nástroji PUNCH zvolit model DIE (tab. 5.1).

Tab. 5.1 Přiřazení nástrojů

| Nástroje (TOOLS)    | MODEL  |
|---------------------|--------|
| Tažník (PUNCH)      | DIE    |
| Tažnice (DIE)       | PUNCH  |
| Přidržovač (BINDER) | BINDER |

Definování přístřihu bylo provedeno v nabídce „Define Blank“. Byl zde přiřazen model přístřihu výtažku a jeho materiál. Materiál lze zvolit z předvolené knihovny materiálů („Material Library“) ve složce „Material“ nebo si v této složce nadefinovat svůj vlastní materiál. Pro plošné tváření je doporučen materiálový typ 36 nebo 37 [3].

Pro zvolený výtažek byl nadefinován nový materiál DC04 (11 305.21). Vlastnosti materiálu které byly vloženy do Dynaformu jsou v tabulce 5.2. Ve složce „Properte“, která je obsažena v „Define tools“ byla nastavena velikost tloušťky plechu („Uniform Thickness“) 1 mm. Nadefinované nástroje a přístřih lze před nastavením pohybu nástrojů zkontrolovat v záložce nabídky „Summary“, která se nachází v záložce „Tools“.

Tab. 5.2 Zadané hodnoty pro materiál DC04

| Materiál DC04  |                          |
|--|--------------------------|
| Měrná hmotnost (Mass density)  | 7,85 kg·m <sup>-3</sup>  |
| Youngův modul pružnosti (Youngs modulus)   | 2,08·10 <sup>5</sup> MPa |
| Poissonova konstanta (Poissons ratio)  | 0,3 [-]                  |
| Model křivky zpevnění (Hardening rule)   | 2 – exponenciální křivka |
| Konstanta pevnosti (Material param P1 (K))                                       | 494 MPa                  |
| Průměrný exponent deformačního zpevnění (Material param P2 (n))                  | 0,264 [-]                |
| Materiálová konstanta (Exponent Face) – Kubická prostorově středěná mřížka (BCC) | 6                        |
| Součinitel plastické anizotropie 0° vůči směru válcování (Lankford param R00)    | 1,50 [-]                 |
| Součinitel plastické anizotropie 45° vůči směru válcování (Lankford param R45)   | 1,10 [-]                 |
| Součinitel plastické anizotropie 90° vůči směru válcování (Lankford param R90)   | 1,65 [-]                 |

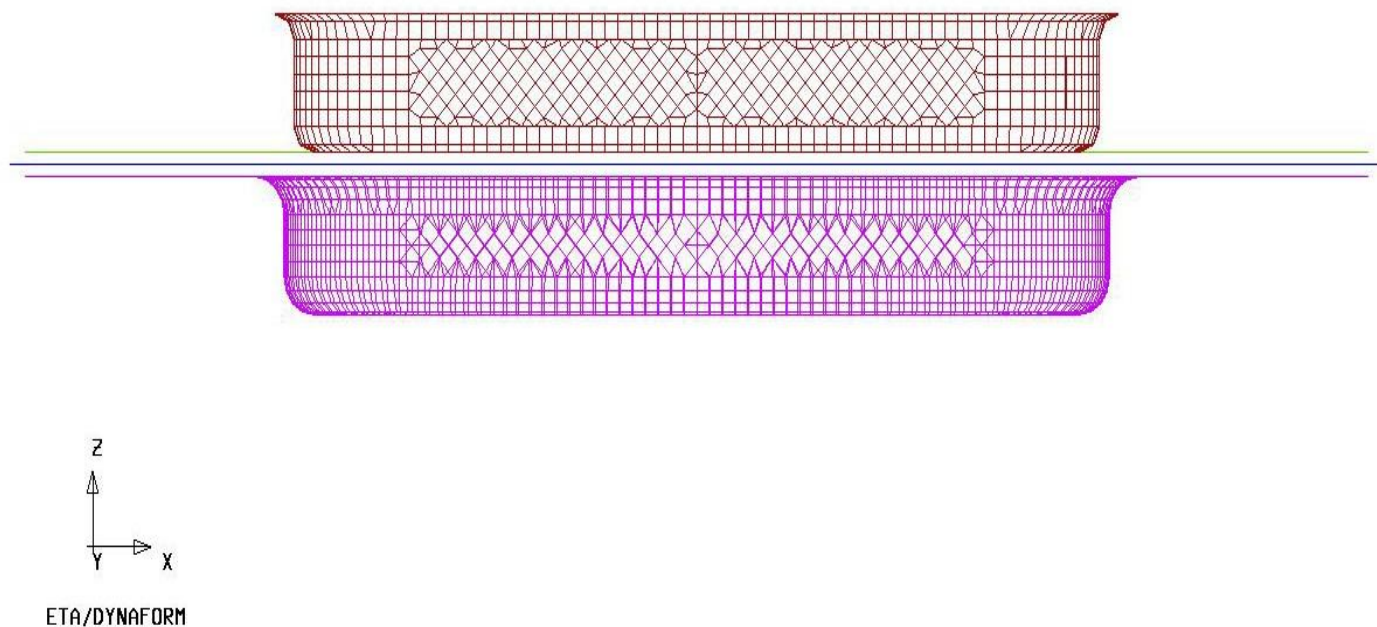


## 5.4 Nastavení pohybu nástrojů v programu DYNAFORM 5.2

Nástroje a přístřih byly ustaveny do výchozích poloh lisování ve složce „Auto Position“ v nabídce „Position Tools“.

### Zadané hodnoty ve složce Auto Position:

|   |                    |
|---|--------------------|
| Hlavní nástroje (Master Tools (fixed)): | PUNCH, DIE, BINDER |
| Deformované nástroje (Slave Tools):     | BLANK              |
| Směr pohybu (Direction):                | Z                  |
| Tažná mezera (Contact Gap):             | 1 mm               |



Obr. 5.4 Výchozí pozice nástrojů a přístřihu (modrá-přístřih, zelená-přidržovač)

V nabídce „Define Tools“ byly nadefinovány všechny okrajové podmínky potřebné k výpočtu. Zadané hodnoty pro jednotlivé nástroje viz tabulky 5.4, 5.5 a 5.6.

Tab. 5.4 Zadané hodnoty tažníku

| Tažník (PUNCH)                               |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Stupně volnosti (Degrees of Freedom)         | Z                                     |
| Typ kontaktu (Contact Type)                  | Forming_One_Way_S_S (povrch nástrojů) |
| Součinitel smykového tření (Static friction) | 0,125 [-]                             |
| Koeficient tlumení (Damping Coeff)           | 20 [-]                                |
| Tvar křivky pohybu (Curve Shape)             | Trapezoidal                           |
| Začátek pohybu (Begin Time)                  | 0 s                                   |
| Rychlost pohybu (Velocity)                   | 0,5 m·s <sup>-1</sup>                 |
| Zdvih (Stroke Dist)                          | 11,9                                  |

Rychlost pohybu tažníku byla zvolena dle doporučení odborné literatury 0,5 m·s<sup>-1</sup>. Ve složce „Min. Distance“ umístěné v nabídce „Tools Position“ byla změřena vzdálenost mezi tažníkem a tažnicí (13 mm). Od změřené hodnoty byla odečtena tloušťka materiálu s technologickým přídávkem 10% (1,1 mm), proto hodnota 11.9 mm.

Tab. 5.5 Zadané hodnoty tažnice

| Tažnice (DIE)                                |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Typ kontaktu (Contact Type)                  | Forming_One_Way_S_S (povrch nástrojů) |
| Součinitel smykového tření (Static friction) | 0,125 [-]                             |
| Koeficient tlumení (Damping Coeff)           | 20 [-]                                |

Tab. 5.6 Zadané hodnoty přidržovače

| Přidržovač (BINDER)                          |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Typ kontaktu (Contact Type)                  | Forming_One_Way_S_S (povrch nástrojů) |
| Součinitel smykového tření (Static friction) | 0,125 [-]                             |
| Koeficient tlumení (Damping Coeff)           | 20 [-]                                |
| Začátek pohybu (Begin Time)                  | 0 s                                   |
| Síla přidržovače (Force)                     | dle výpočtu                           |

Protože má každý přístřih jiný tvar a rozměry, je plocha kontaktu přidržovače s přístřihem u každého případu jiná. Tím se tedy mění i síla přidržovače  $F_p$ , kterou lze určit ze vztahu [5]:

$$F_p = p_p \cdot S_p \quad [\text{N}] \quad (5.1)$$

kde  $p_p$  měrný tlak přidržovače [MPa],

$S_p$  účinná plocha přidržovače [mm<sup>2</sup>].

Měrný tlak přidržovače byl zvolen 2 MPa dle doporučení odborné literatury [9]. Účinná plocha přidržovače byla spočítána pomocí programu CATIA V5R6. V tabulce 5.7 jsou uvedeny jak přidržovací síly, plocha přístřihu tak i účinná plocha přidržovače.

Tab. 5.7 Přidržovací síly pro jednotlivé přístřihy

| Přístřihy   | Plocha přístřihu $S$ [mm <sup>2</sup> ] | Účinná plocha přidržovače $S_p$ [mm <sup>2</sup> ] | Měrný tlak $p_p$ [MPa] | Přidržovací síla $F_p$ [N] |
|-------------|---|--|------------------------|----------------------------|
| ČSN         | 17 907,85                               | 15 019,25  | 2                      | 30 038,5                   |
| BSE modul   | 15 249,89                               | 14 610,05  | 2                      | 29 220,1                   |
| Metoda řezů | 16 112,94                               | 14 885,87  | 2                      | 29 771,7                   |
| TMSN        | 16 363,62                               | 14 545,76  | 2                      | 29 091,5                   |

Po nastavení všech podmínek byla provedena kontrolní animace pohybu nástrojů (modul „Tools“, záložka „Animate“). Poté byly v modulu „Analysis“ ve složce LS-DYNA nastaveny parametry pro výpočet simulace a výsledný soubor byl uložen jako .dyn.

## **5.5 Výpočet simulace v podprogramu Submit Dyna Jobs**

Výpočet simulace byl proveden pomocí podprogramu LS DYNA Jobs Submitter 2.2, který je umístěn v menu programu Dynaform 5.2. V podprogramu LS DYNA Jobs Submitter byly nadefinovány kontrolní parametry (Control Parameter) a nastavena cesta k řešiči LS DYNA (ls970.exe). Byl načten soubor s příponou dyn („Add Dyn Job”) do programu LS DYNA Jobs Submitter a spuštěno řešení („Submit Jobs”). Podprogram LS DYNA je řešič, který počítá simulace metodou konečných prvků. Čas výpočtu je závislý na rychlosti procesoru a velikosti vytvořené sítě konečných prvků u přístřihu

## **5.6 Zpracování výsledků simulace v programu ETA/Post Processor**

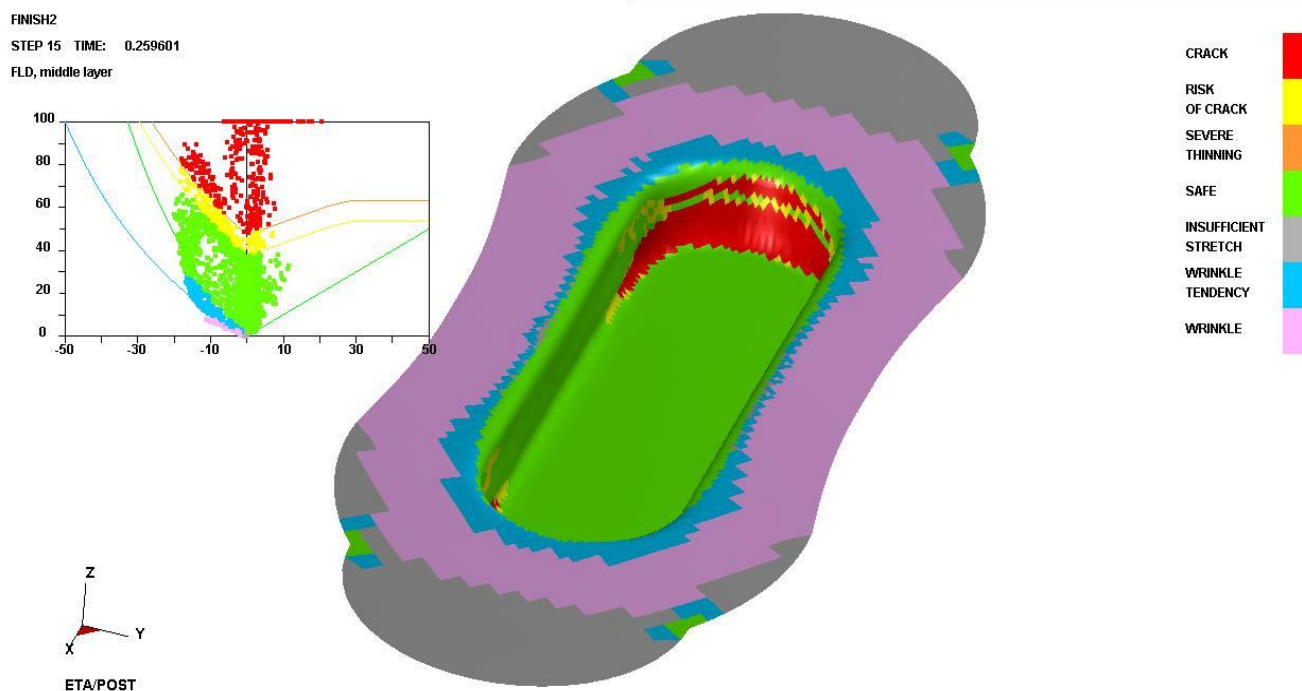
Výsledky simulace lze prohlížet v programu ETA/Post-Processor, který je součástí balíčku Dynaform 5.2. Do programu je možné načíst výsledné soubory d3plot nebo dynain. Soubor d3plot obsahuje veškeré informace o průběhu simulace tažení, proces je rozdělen do několika kroků, které je možno prohlédnout každý zvlášť nebo spustit celou simulaci kterou můžeme uložit jako video soubor s příponou avi. Soubor dynain obsahuje informace o konečném kroku tažení.

V programu ETA/Post-Processor je celá řada analýz, podle kterých je možno výtažek hodnotit. Byly použity tyto: tvářecí mezní diagram („Forming Limit Diagram“), normálové napětí („Norm Strain“), tloušťka materiálu („Thickness“), ztenčení materiálu („Thinning“), pohyb okraje přístřihu při tažení („Edge Movement”).

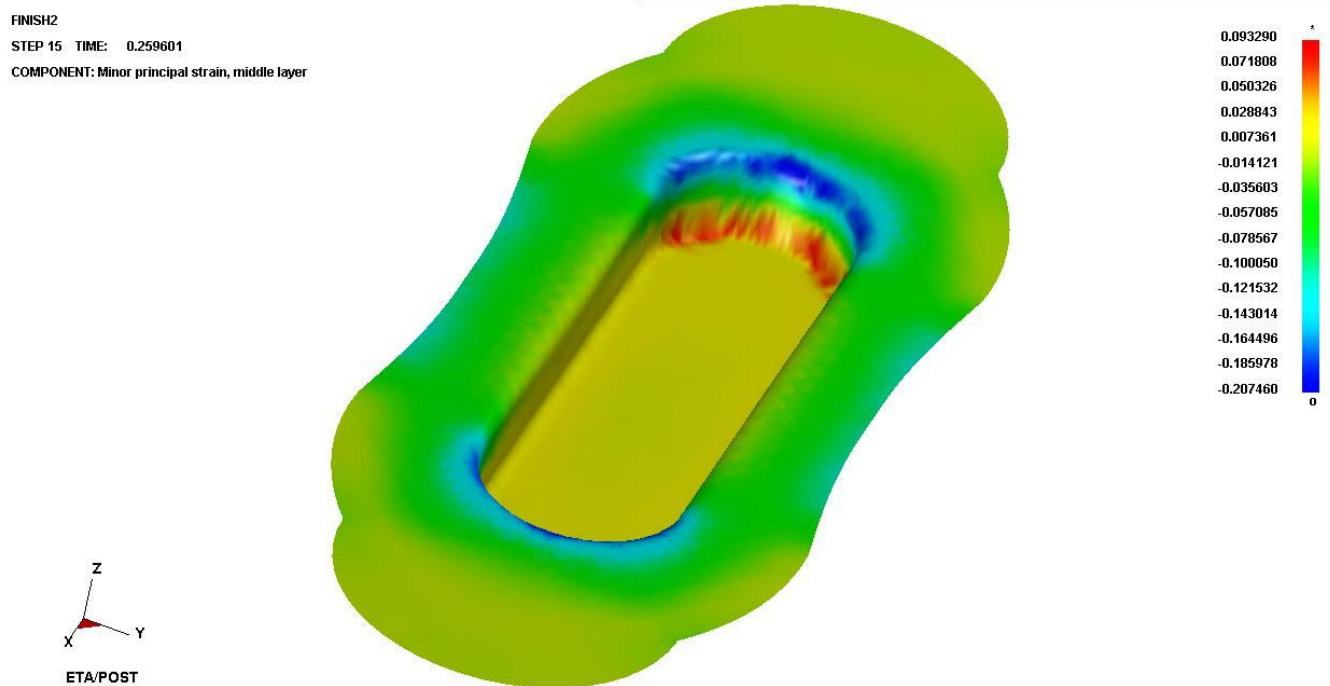
## **5.7 Výsledky simulace procesu tažení**

Výsledky simulace jsou rozděleny podle použitého přístřihu. U každého přístřihu byly použity stejné analýzy, aby se daly porovnat výsledky jednoduše porovnat.

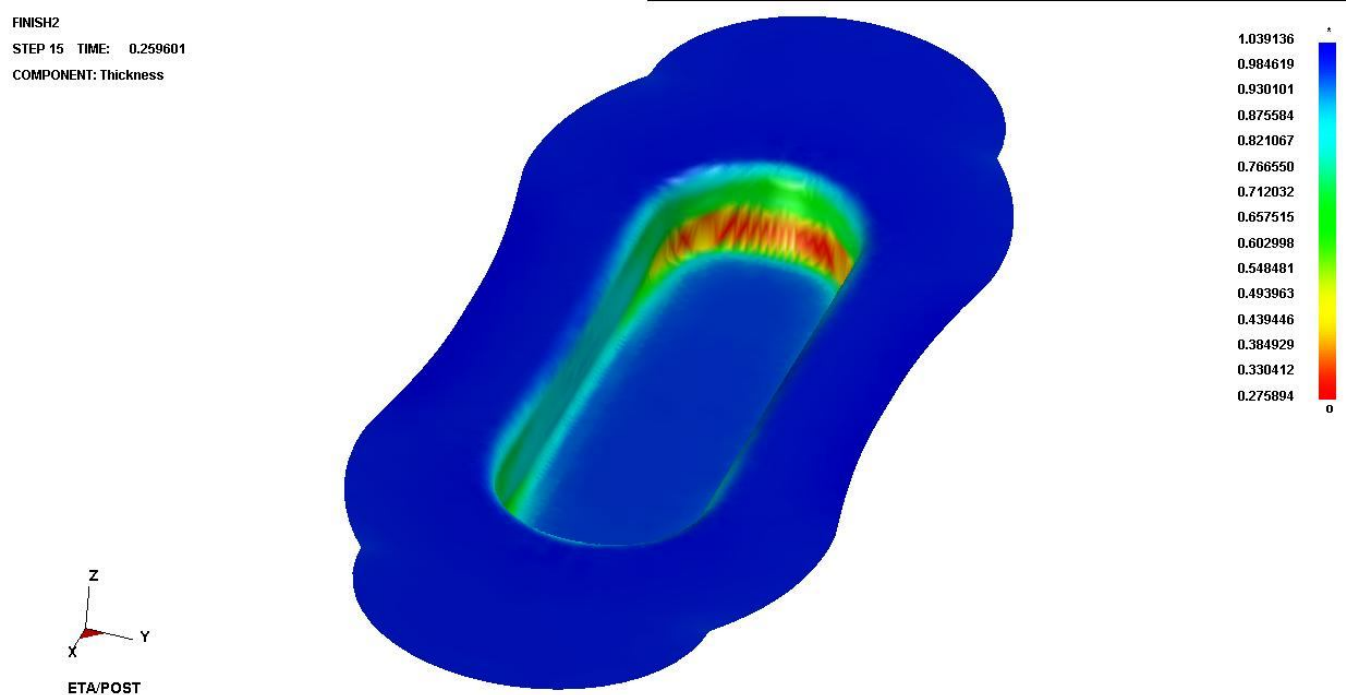
### 5.7.1 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného dle ČSN 22 7303



Obr. 5.7 Výtažek zadaného krytu, tažený z přístřihu dle ČSN 22 7303 se zobrazeným mezním diagramem



Obr. 5.8 Normálové napětí v zadaném výtažku krytu, taženém z přístřihu dle ČSN 22 7303

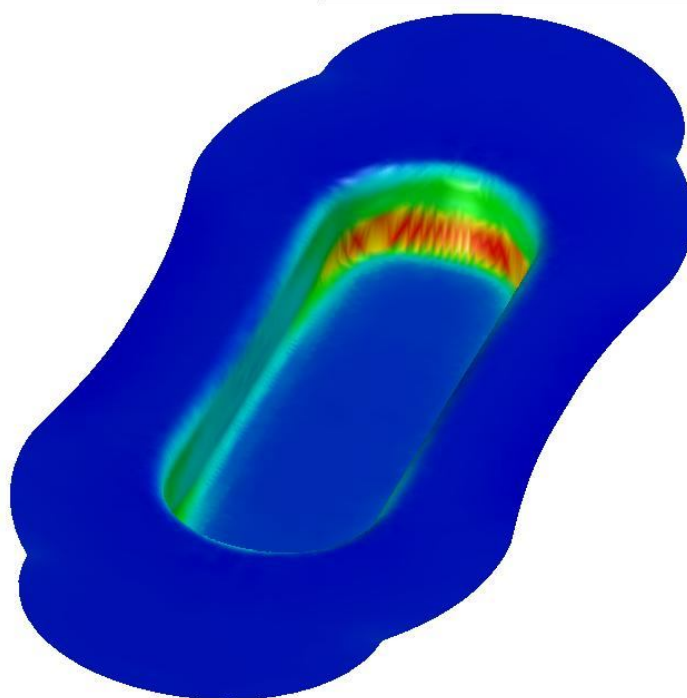


Obr. 5.9 Tloušťka zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu dle ČSN 22 7303

FINISH2  
STEP 15 TIME: 0.259601  
COMPONENT: Thinning

72.410553  
66.958832  
61.507103  
56.055382  
50.603657  
45.151936  
39.700211  
34.248486  
28.796764  
23.345039  
17.893316  
12.441593  
6.989870  
1.538146  
-3.913577  
0

Z  
Y  
X  
ETA/POST

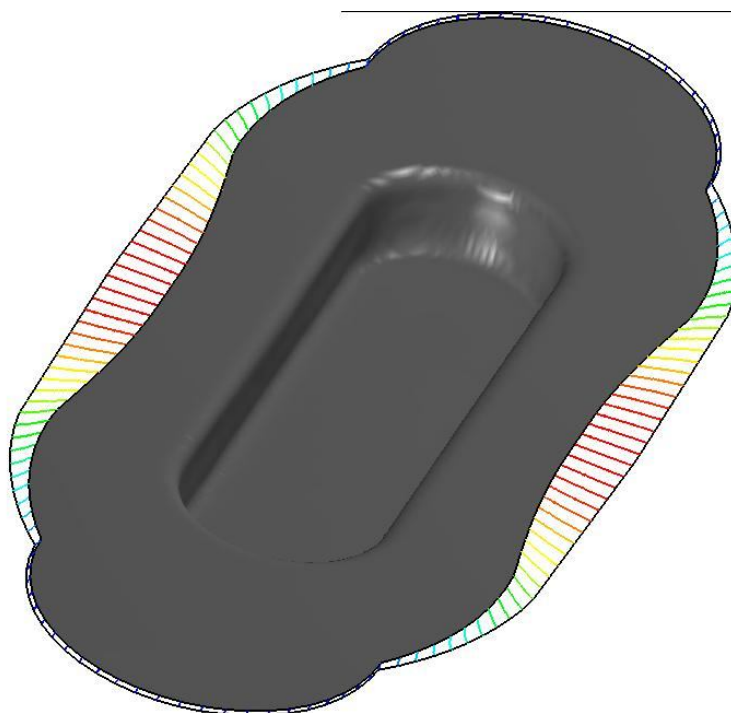


Obr. 5.10 Ztenčení zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu dle ČSN 22 7303

FINISH2  
EDGE MOVEMENT  
STEP 15 TIME: 0.259601

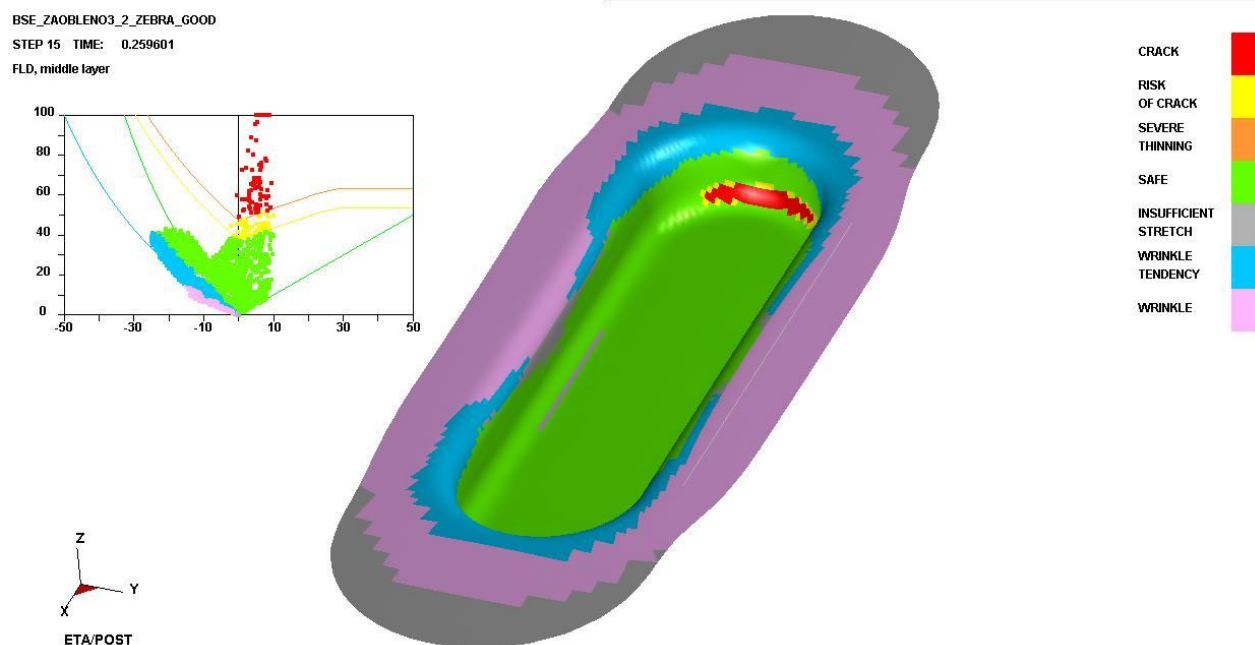
7.417610  
6.964350  
6.511091  
6.057831  
5.604571  
5.151312  
4.698052  
4.244792  
3.791533  
3.338274  
2.885014  
2.431754  
1.978495  
1.525235  
1.071975  
0

Z  
Y  
X  
ETA/POST

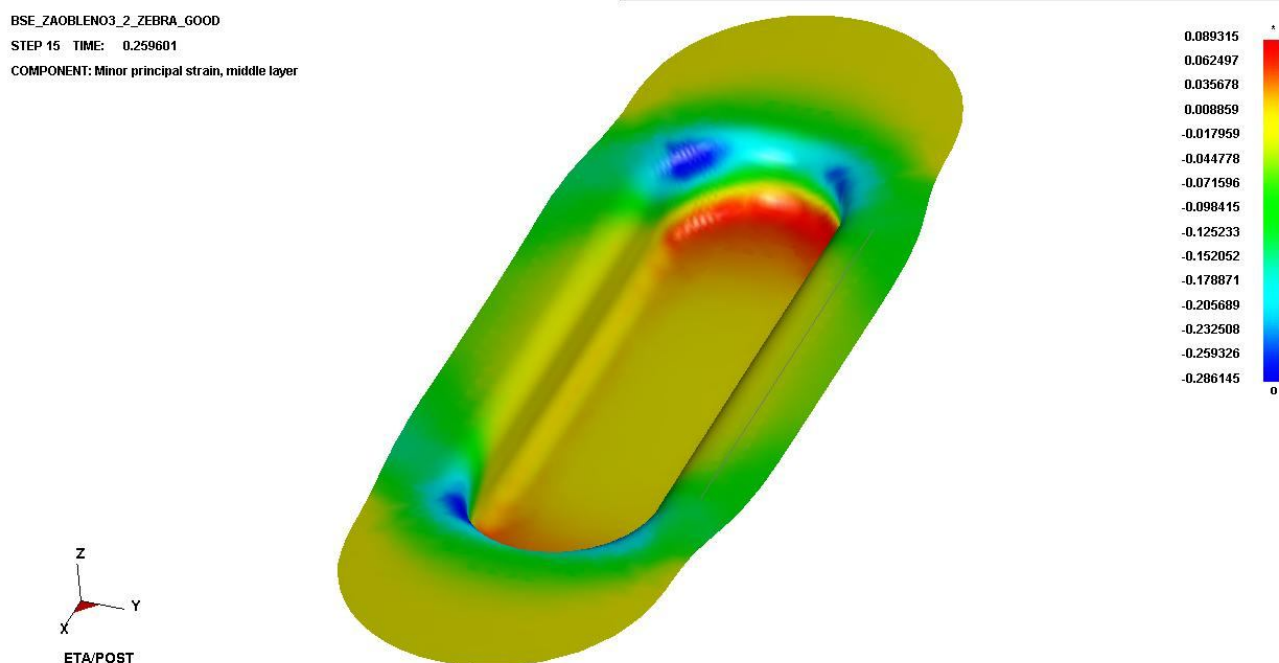


Obr. 5.11 Pohyb okraje přístřihu výtažku krytu dle ČSN 22 7303

## 5.7.2 Simulace tažení krytu z přístřihu sestrojeného pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 s použitím brzdících žeber



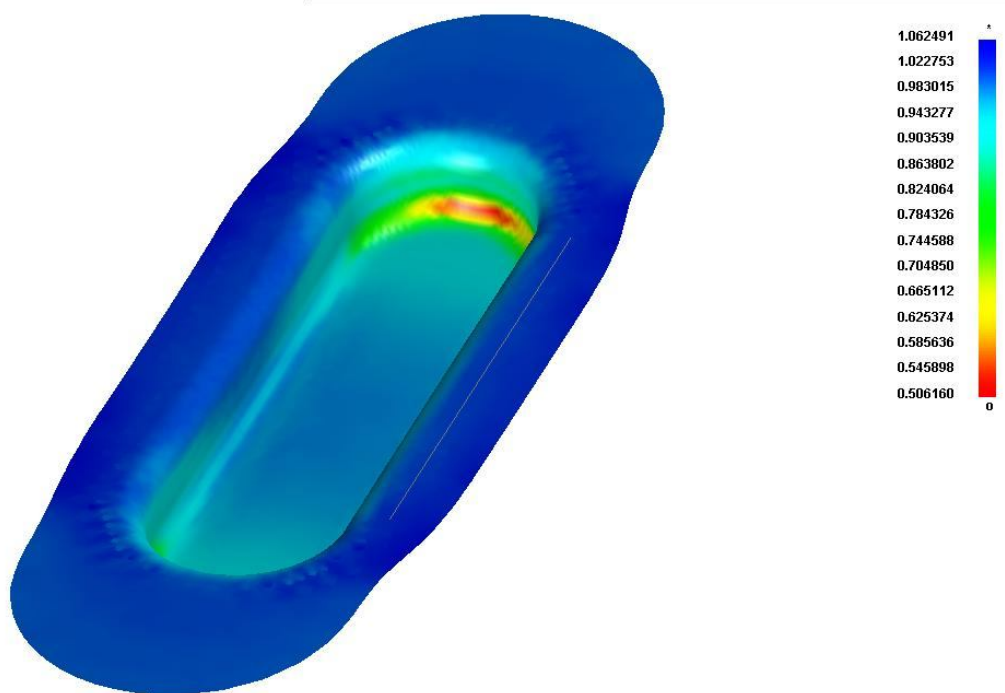
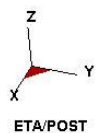
Obr. 5.12 Výtažek zadaného krytu, tažený z přístřihu dle BSE modulu se zobrazeným mezním diagramem při použití brzdících žeber.



Obr. 5.13 Normálové napětí ve výtažku krytu, taženém z přístřihu dle BSE modulu s použitím brzdících žeber

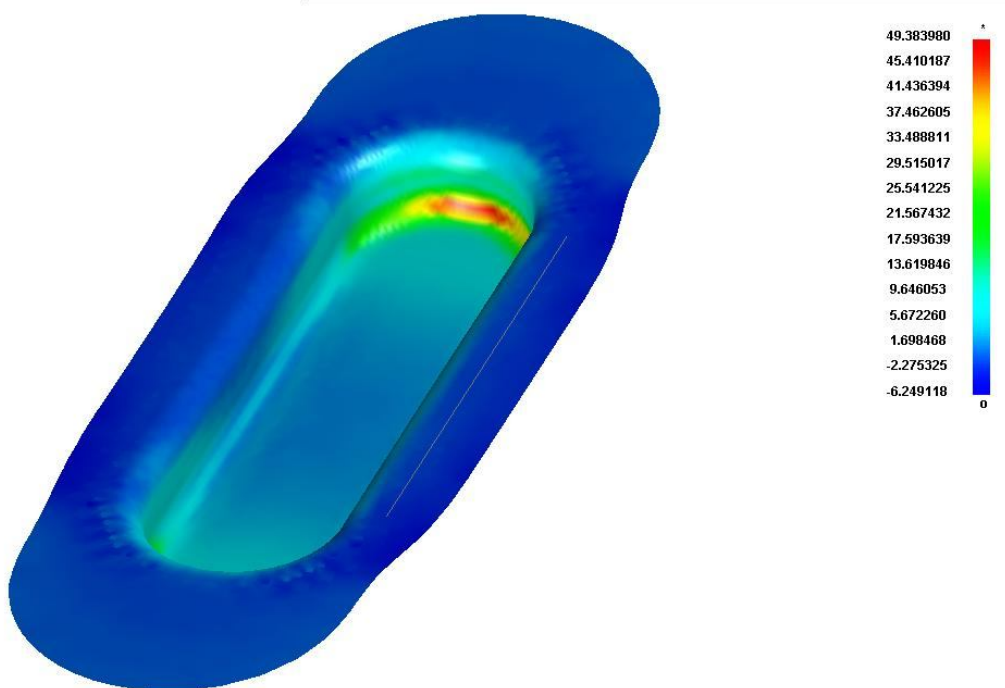
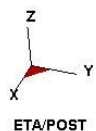


BSE\_ZAOBLEN03\_2\_ZEBRA\_GOOD  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Thickness



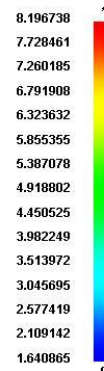
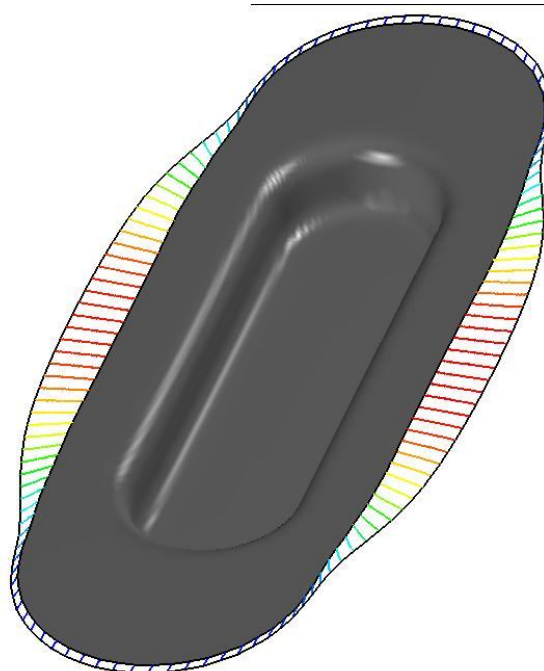
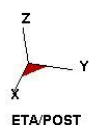
Obr. 5.14 Tloušťka výtažku krytu, taženém z přístřihu dle BSE modulu s použitím brzdících žeber

BSE\_ZAOBLEN03\_2\_ZEBRA\_GOOD  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Thinning



Obr. 5.15 Ztenčení výtažku krytu, taženém z přístřihu dle BSE modulu s použitím brzdících žeber

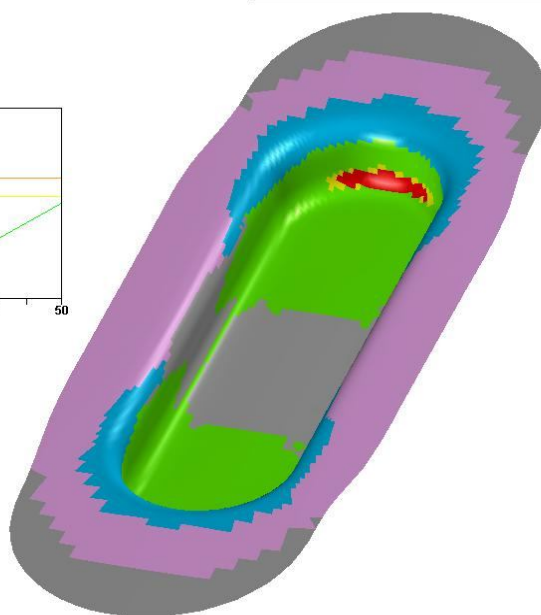
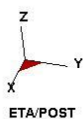
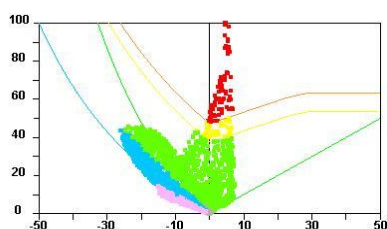
BSE\_ZAOBLEN03\_2\_ZEBRA  
EDGE MOVEMENT  
STEP 15 TIME: 0.259601



Obr. 5.16 Pohyb okraje přístřihu krytu, sestrojeného dle BSE modulu s použitím brzdících žeber

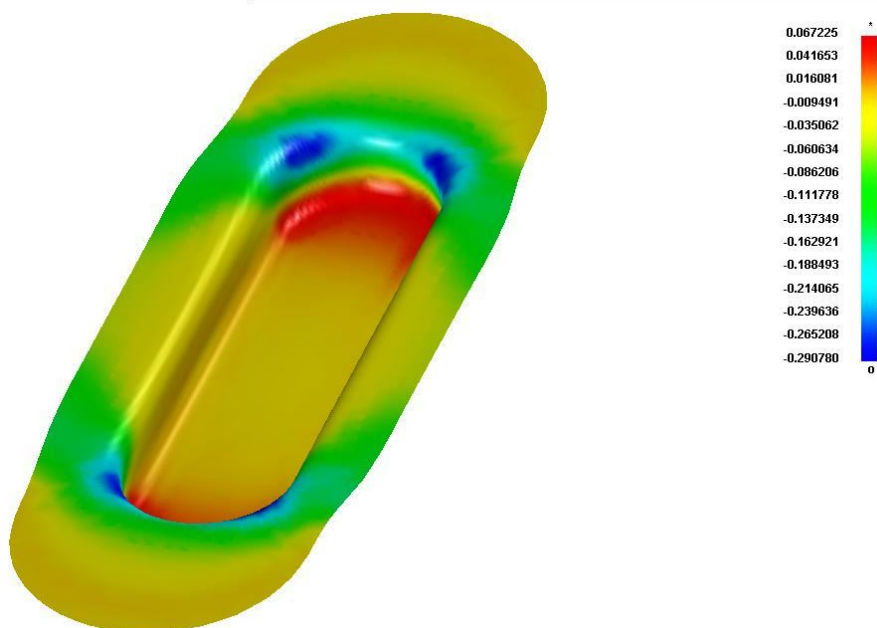
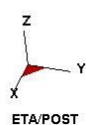
### 5.7.3 Simulace tažení krytu z přístřihu sestrojeného pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 bez použití brzdících žeber

BSE\_ZAOBLEN03\_2  
STEP 15 TIME: 0.259601  
FLD, middle layer



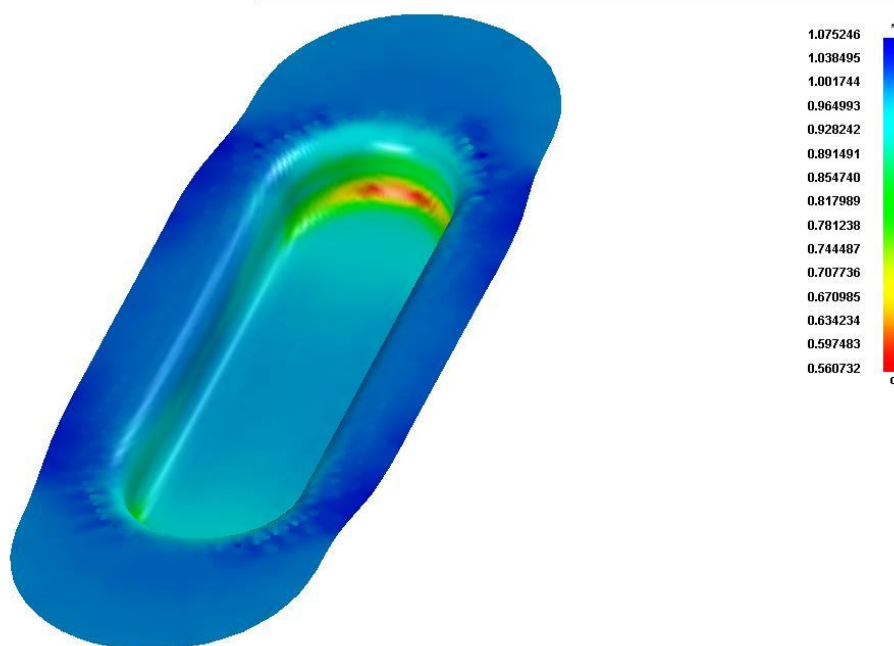
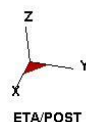
Obr. 5.17 Výtažek zadaného krytu, tažený z přístřihu dle BSE modulu se zobrazeným mezním diagramem bez použití brzdících žeber.

BSE\_ZAOBLEN03\_2  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Minor principal strain, middle layer



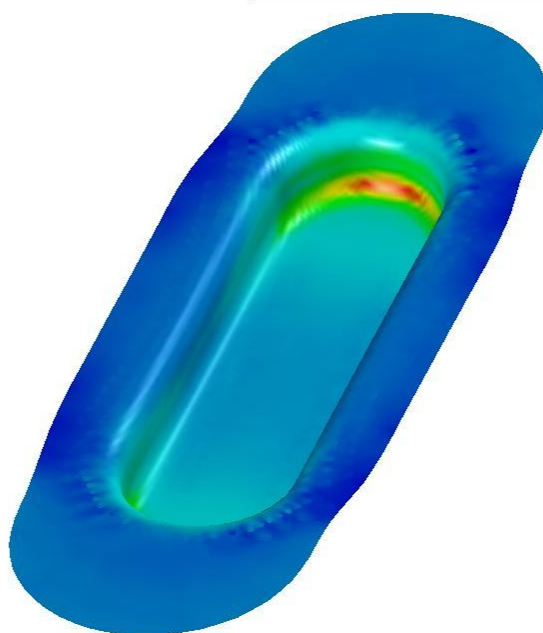
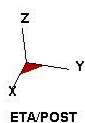
Obr. 5.18 Normálové napětí ve výtažku krytu, taženém z přístřihu dle BSE modulu bez použití brzdících žebel

BSE\_ZAOBLEN03\_2  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Thickness



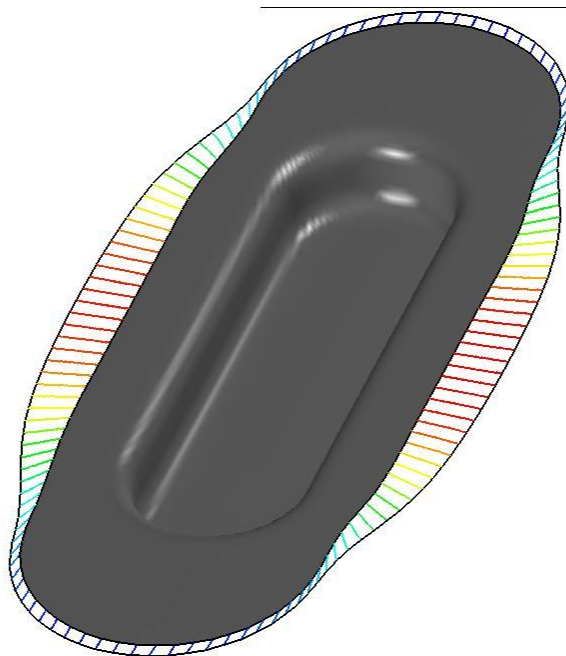
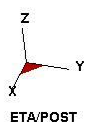
Obr. 5.19 Tloušťka výtažku krytu, taženém z přístřihu dle BSE modulu bez použití brzdících žebel

BSE\_ZAOBLEN03\_2  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Thinning



Obr. 5.20 Ztenčení výtažku krytu, taženém z přístřihu dle BSE modulu bez použití  
brzdících žeber

BSE\_ZAOBLEN03\_2  
 EDGE MOVEMENT  
 STEP 15 TIME: 0.259601



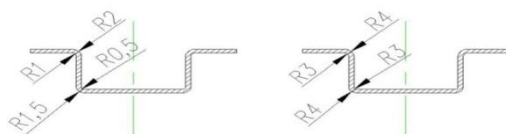
Obr. 5.21 Pohyb okraje přístřihu krytu, sestrojeného dle BSE modulu bez použití  
brzdících žeber

## 6 Analýza kritických míst zadaného krytu a úprava tvaru součásti

Po simulaci tažení krytu posuvných dveří lze prohlížet v programu ETA/Post-Processor, který je součástí balíčku Dynaform 5.2 celý proces tažení. Do programu je možné načíst výsledné soubory .d3plot nebo .dynain. Soubor d3plot obsahuje veškeré informace o průběhu simulace tažení.

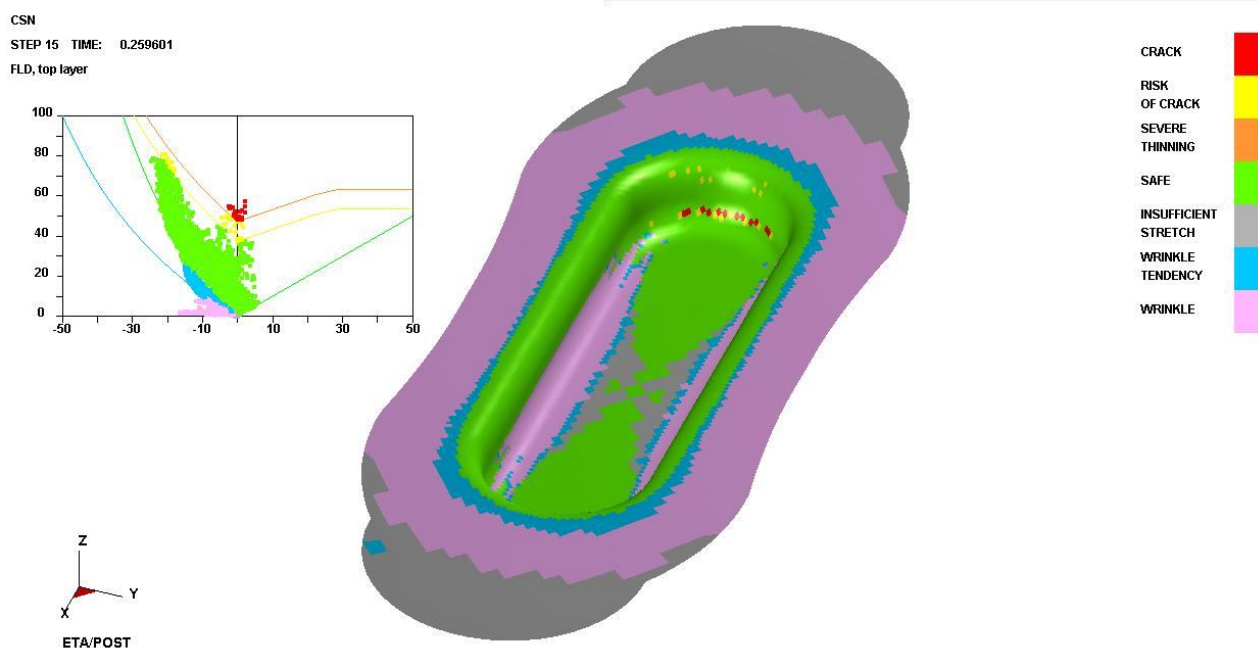
Jako hlavní nástroj analýzy poslouží poslední krok tažení s vyobrazeným mezním diagramem, kde jsou jasně vyznačena místa prasklin a to červenou barvou. Zelená barva značí bezpečná místa na výtažku a barva fialová značí místa náchylné ke zvlnění. Na obrázku 5.7 v kapitole 5.7.2 je při požadovaném zaoblení hran viz příloha A1 jasně viditelná červená část v největším místě zaoblení u dna výtažku krytu. Tato část vyjadřuje prasklinu která je ve výrobě naprosto nepřijatelná, docházelo by k zmetkovitosti součástí. Výroba by tedy pro zadanou součást (kryt posuvných dveří) musela být prováděna na dvě operace, operace tažení a operace kalibrovací. Kalibrační část by byla jak časově tak hlavně finančně náročná, proto je tato možnost nepřijatelná. Při tažení zadaného krytu byla použita i varianta s brzdícími žebry, která je vyobrazena na obrázcích 5.12 až 5.16 v kapitole 5.7.3. Pro porovnání je použit stejný přístřih bez použití žebíř na obrázcích 5.17 až 5.21 v kapitole 5.7.4. Tato varianta oblast praskliny nijak extrémně nezmenšila, proto bylo použití brzdících žebíř zamítnuto. Zadaný kryt byl upraven tak, aby byl vyrobitelný pouze na jednu operaci, bez použití brzdících žebíř a s odstraněním rizika vzniku prasklin.

Celá úprava spočívá v redukci zaoblení zadaného krytu, tedy ve zvětšení zaoblení hran tažníku i tažnice. Otázka volby optimálního zaoblení tažnice je složitá. Ke zmenšení radiálního napětí  $\sigma_r$  je nutné zvětšit poloměry tažníku i tažnice, ne však příliš. Nadměrné zvětšení poloměru tažnice není možné, protože by velká část plechu nebyla podepřená a tím by mohlo docházet k sekundárnímu zvlnění na povrchu plechu. Redukce poloměrů plechu je naznačena na obrázku 6.1. Vnější zaoblení bylo zvětšeno na hodnotu 4 mm, zatímco vnitřní bylo zvoleno 3 mm. Takto upravený tvar byl simulován v programu Dynaform 5.2 a následně porovnán pravosechny použité přístřihy.

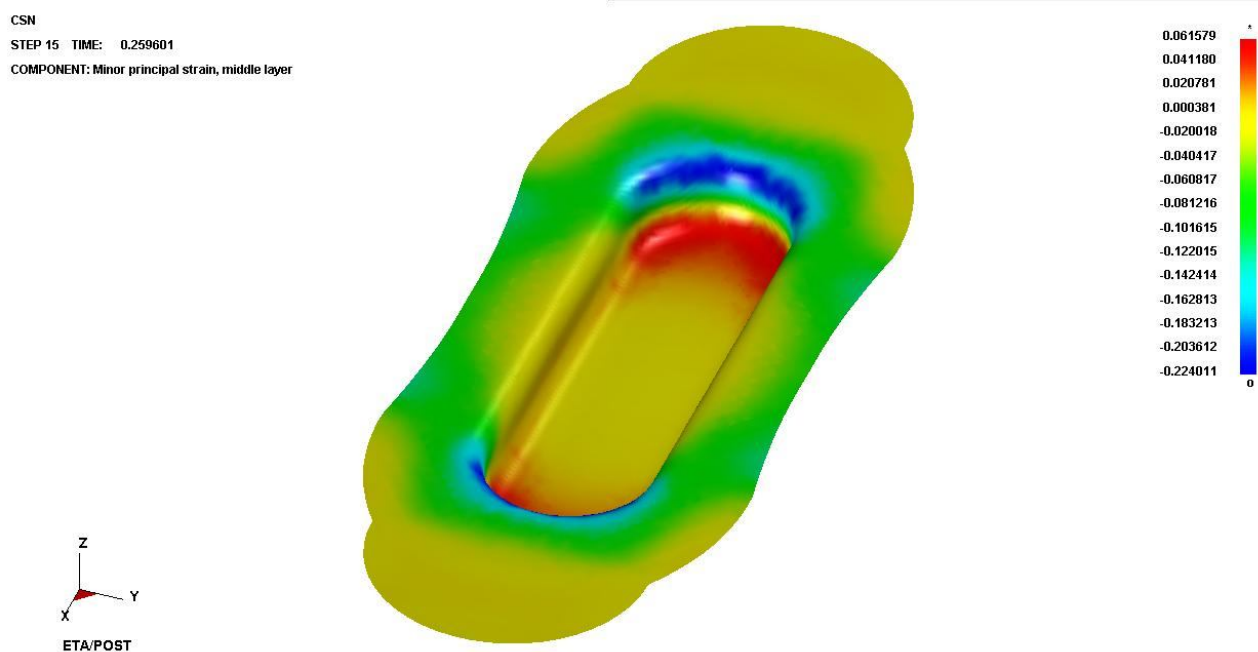


Obrázek 6.1 Vlevo stávající zaoblení, vpravo redukované zaoblení

## 6.1 Simulace tažení krytu posuvných dveří z příštíhu sestrojeného dle ČSN 22 7303 po úpravě zaoblení



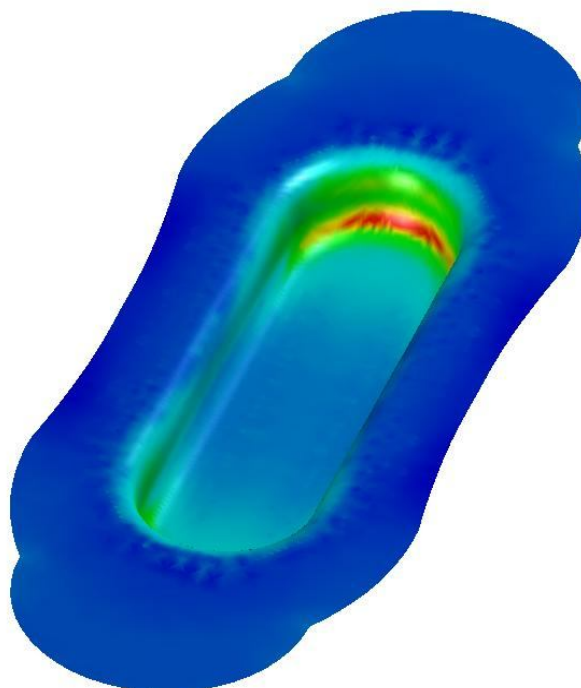
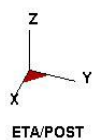
Obr. 6.2 Výtažek zadaného krytu, tažený z příštíhu dle ČSN 22 7303 se zobrazeným mezním diagramem po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)



Obr. 6.3 Normálové napětí v zadaném výtažku krytu, taženém z příštíhu dle ČSN 22 7303 po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)



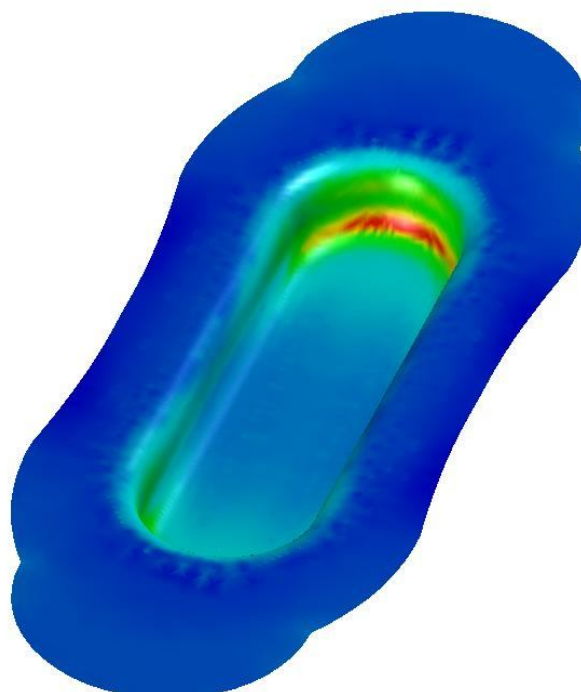
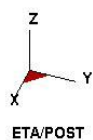
CSN  
STEP 15 TIME: 0.259601  
COMPONENT: Thickness



1.045544  
1.016053  
0.986562  
0.957072  
0.927581  
0.898090  
0.868600  
0.839109  
0.809618  
0.780127  
0.750637  
0.721146  
0.691655  
0.662165  
0.632674  
0

Obr. 6.4 Tloušťka zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu dle ČSN 22 7303 po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

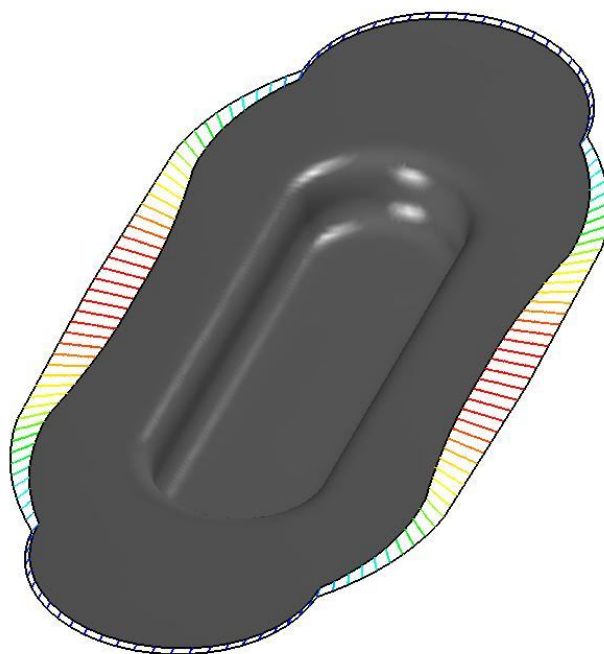
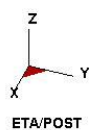
CSN  
STEP 15 TIME: 0.259601  
COMPONENT: Thinning



36.732597  
33.783527  
30.834457  
27.885389  
24.936319  
21.987251  
19.038181  
16.089113  
13.140043  
10.190974  
7.241905  
4.292836  
1.343767  
-1.605302  
-4.554371  
0

Obr. 6.5 Ztenčení zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu dle ČSN 22 7303 po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

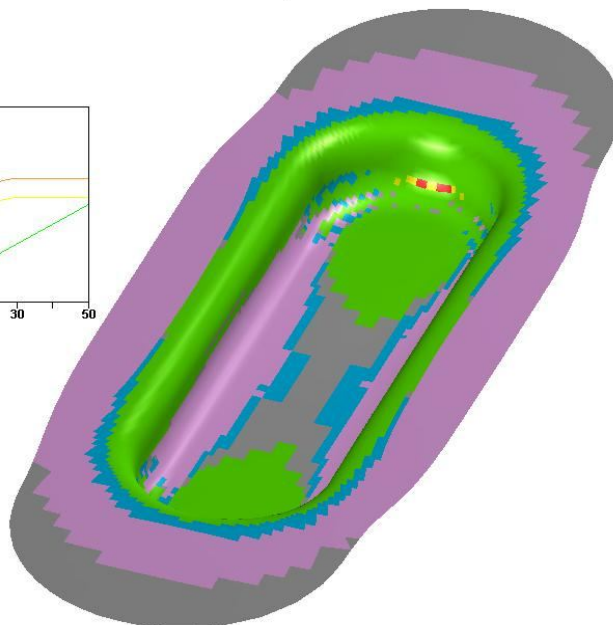
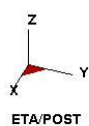
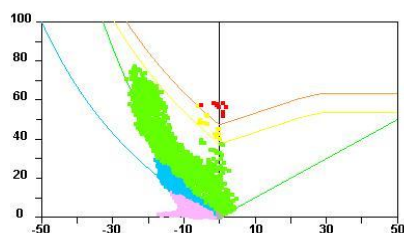
CSN  
EDGE MOVEMENT  
STEP 15 TIME: 0.259601



Obr. 6.6 Pohyb okraje přístřihu výtažku krytu dle ČSN 22 7303 po úpravě zaoblení  
(tažnice=4mm, tažník=3mm)

## 6.2 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného dle BSE modulu po úpravě zaoblení

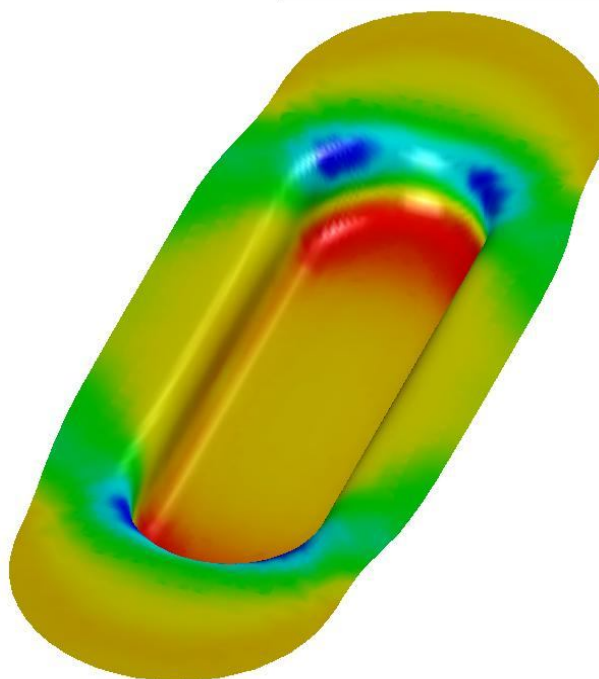
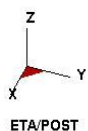
BE  
STEP 14 TIME: 0.241150  
FLD, top layer



Obr. 6.7 Výtažek zadaného krytu, tažený z přístřihu dle BSE modulu se zobrazeným mezním diagramem po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

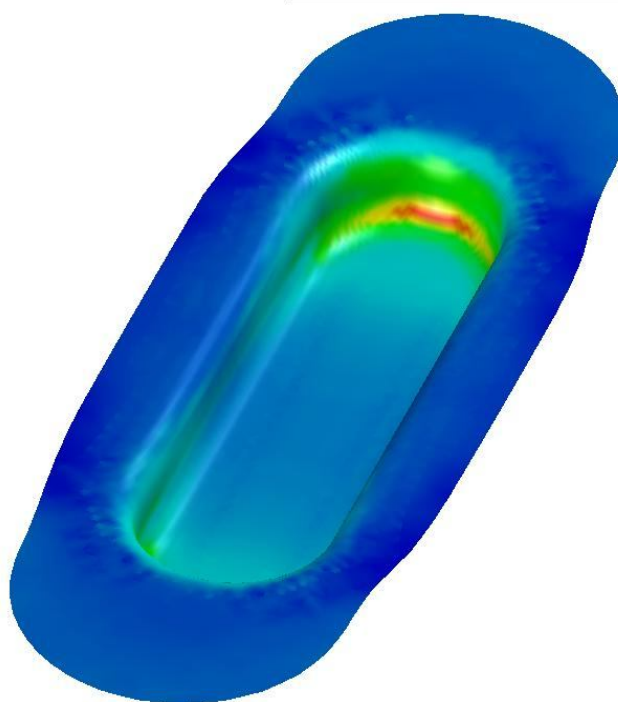
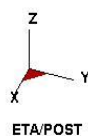


BE  
STEP 15 TIME: 0.259601  
COMPONENT: Minor principal strain, middle layer



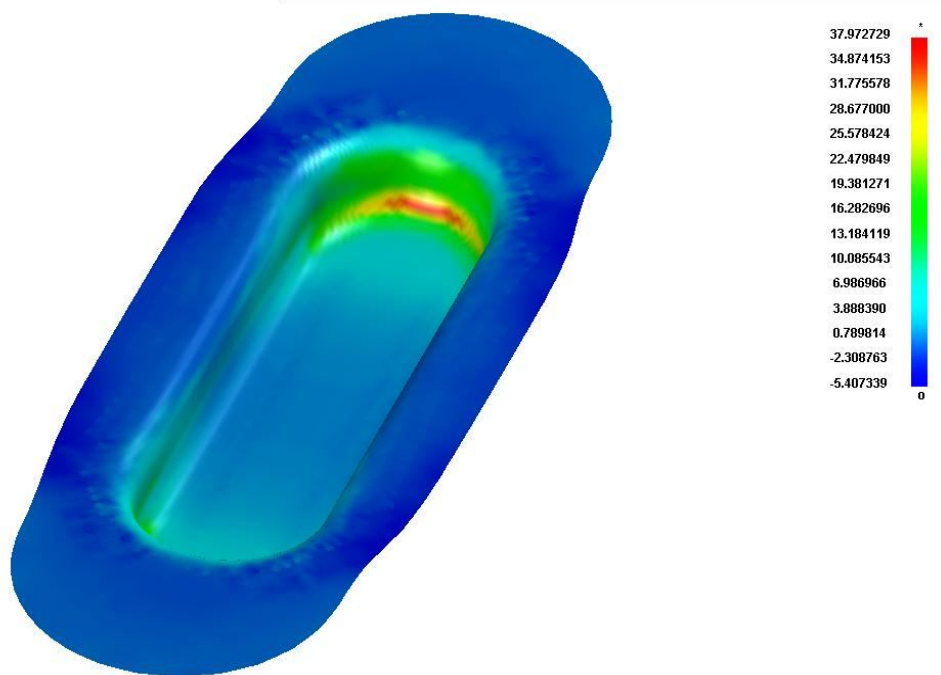
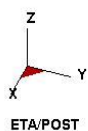
Obr. 6.8 Normálové napětí v zadaném výtažku krytu, taženém z přístřihu dle BSE modulu po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

BE  
STEP 15 TIME: 0.259601  
COMPONENT: Thickness



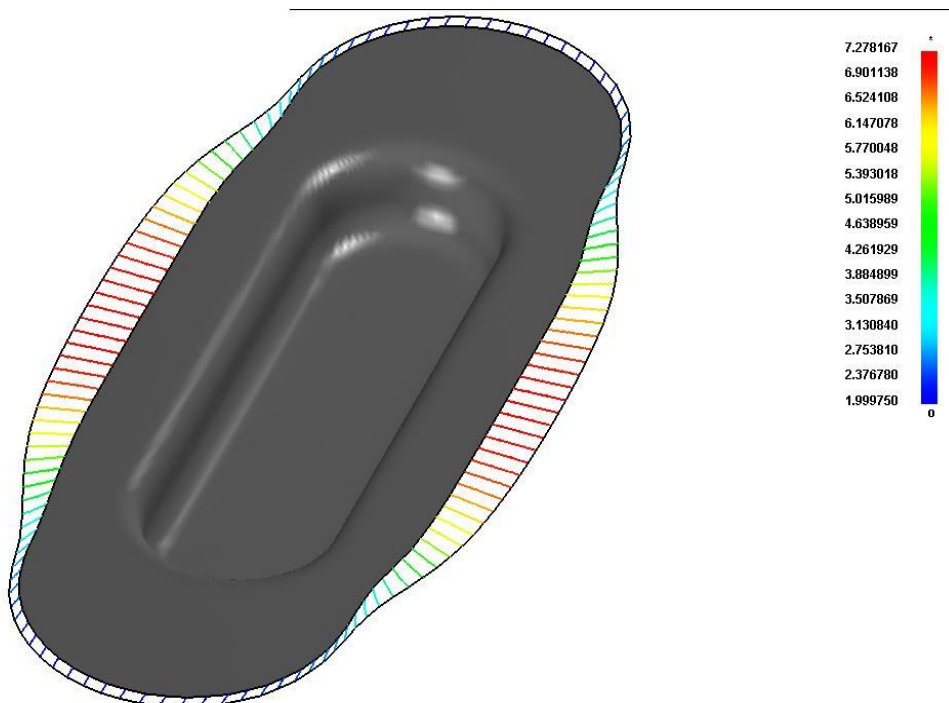
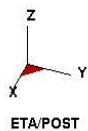
Obr. 6.9 Tloušťka zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu dle BSE modulu po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

BE  
STEP 15 TIME: 0.259601  
COMPONENT: Thinning



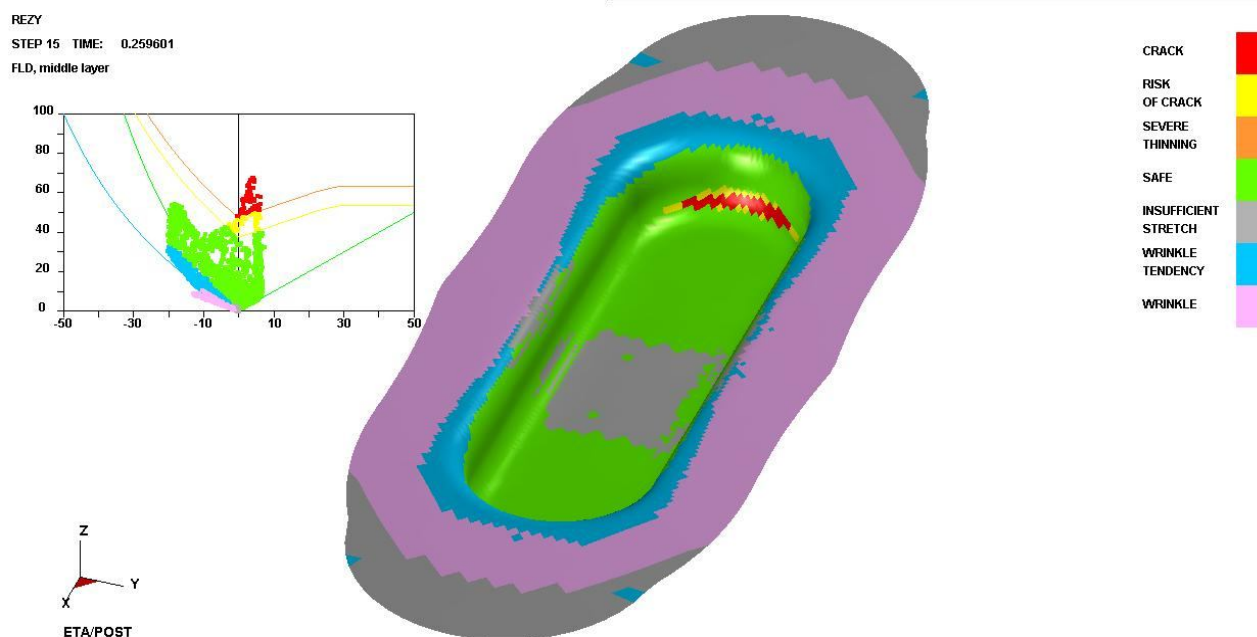
Obr. 6.10 Ztenčení zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu dle BSE modulu po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

BE  
EDGE MOVEMENT  
STEP 15 TIME: 0.259601

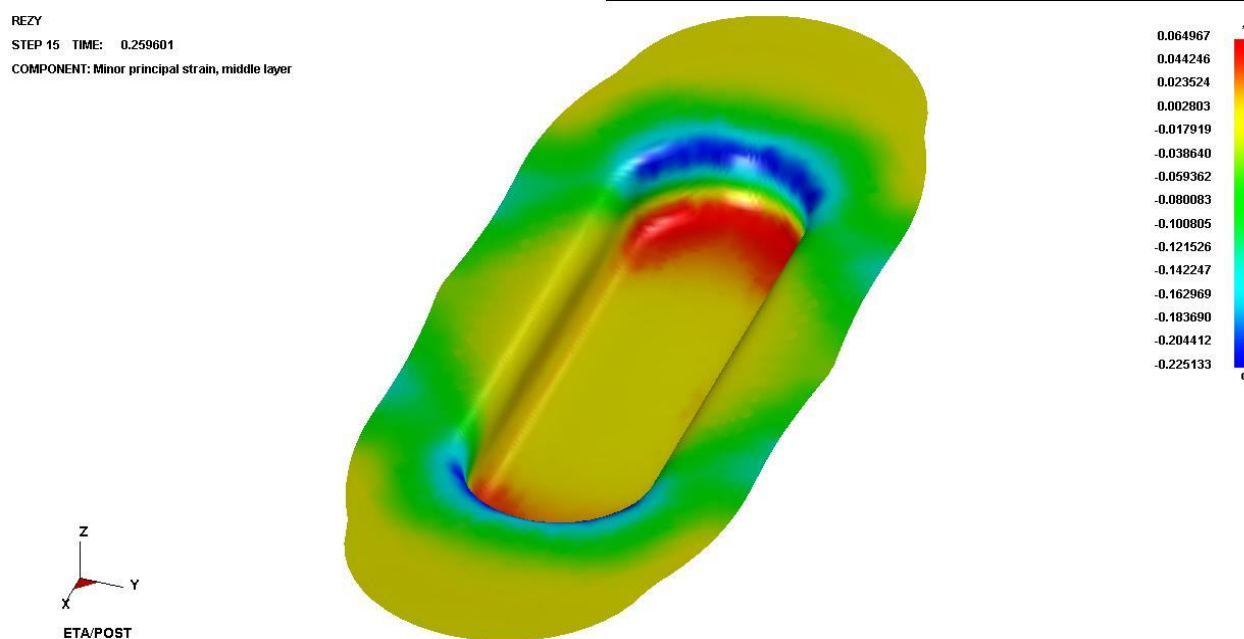


Obr. 6.11 Pohyb okraje přístřihu výtažku krytu sestrojeného dle BSE modulu po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

### 6.3 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístříhu sestrojeného metodou řezů po úpravě zaoblení

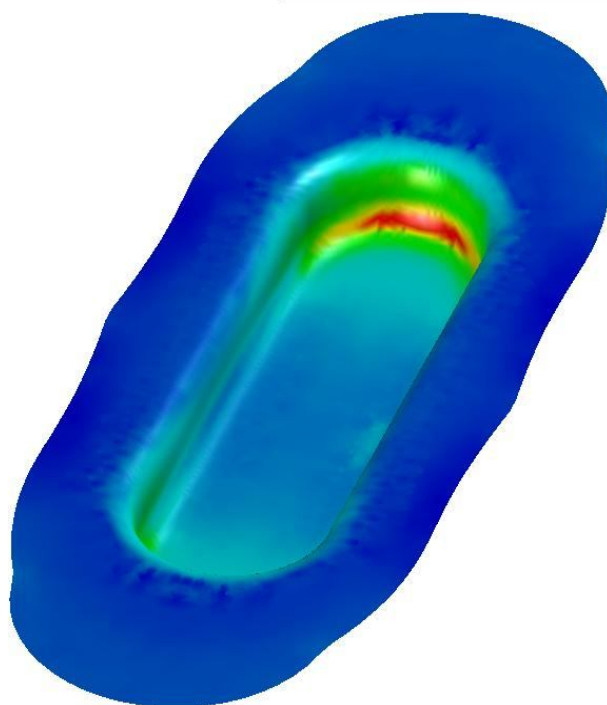
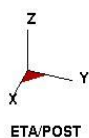


Obr. 6.12 Výtazek zadaného krytu, tažený z přístříhu sestrojeného metodou řezů se zobrazeným mezním diagramem po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)



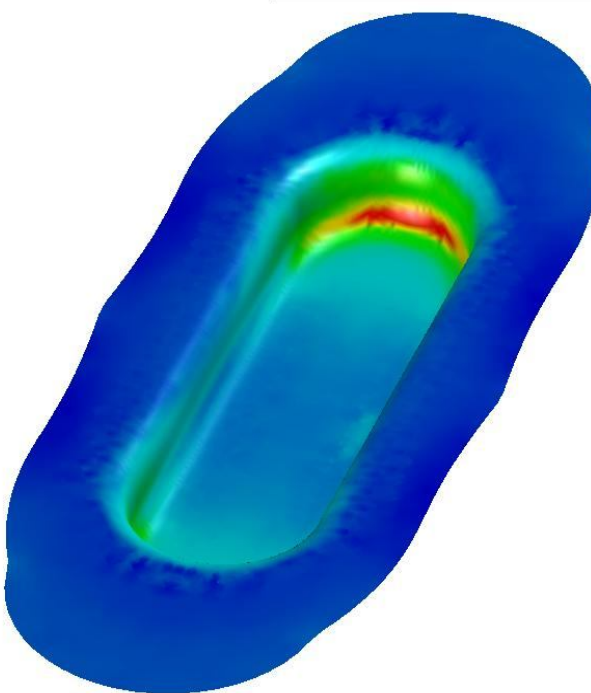
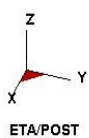
Obr. 6.13 Normálové napětí v zadaném výtazku krytu, taženém z přístříhu sestrojeného metodou řezů po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

REZY  
STEP 15 TIME: 0.259601  
COMPONENT: Thickness



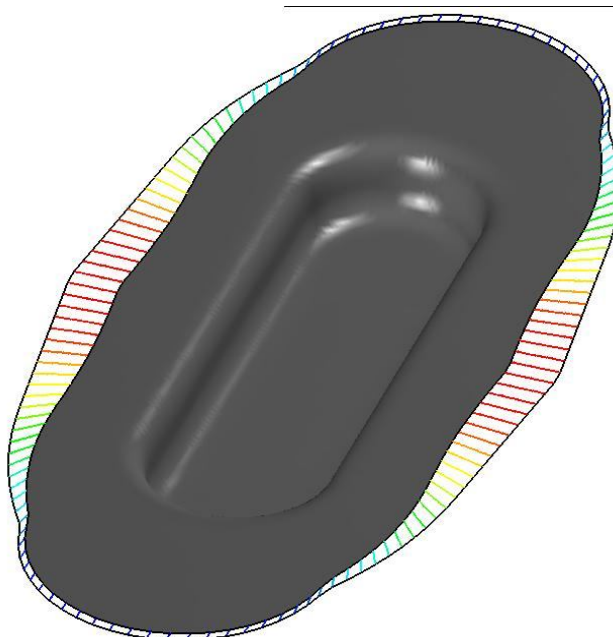
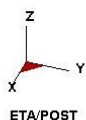
Obr. 6.14 Tloušťka zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu sestrojeného metodou řezů po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

REZY  
STEP 15 TIME: 0.259601  
COMPONENT: Thinning



Obr. 6.15 Ztenčení zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu sestrojeného metodou řezů po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

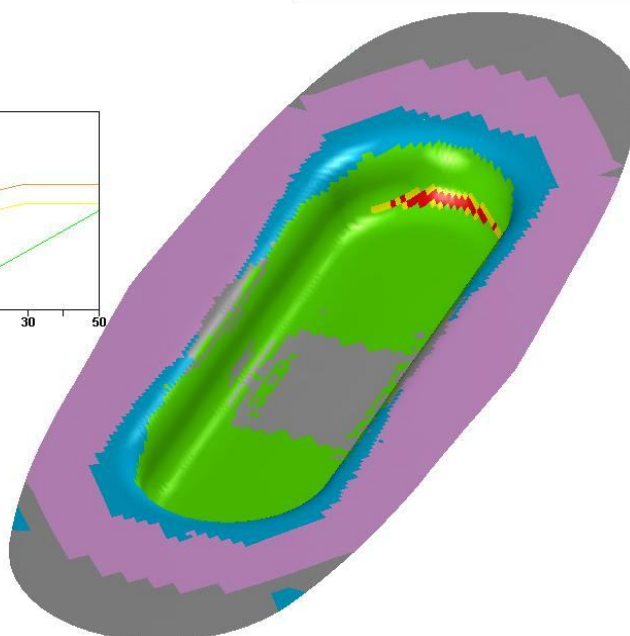
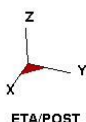
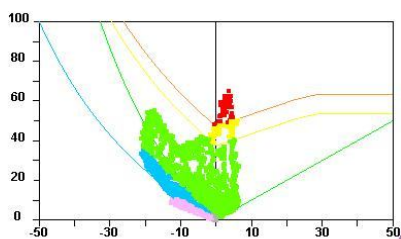
REZY  
EDGE MOVEMENT  
STEP 15 TIME: 0.259601



Obr. 6.16 Pohyb okraje přístřihu výtažku krytu, sestrojeného metodou řezů po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

#### 6.4 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného metodou trajektorií maximálních smykových napětí po úpravě zaoblení

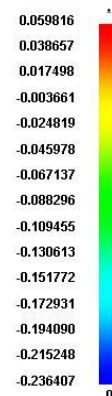
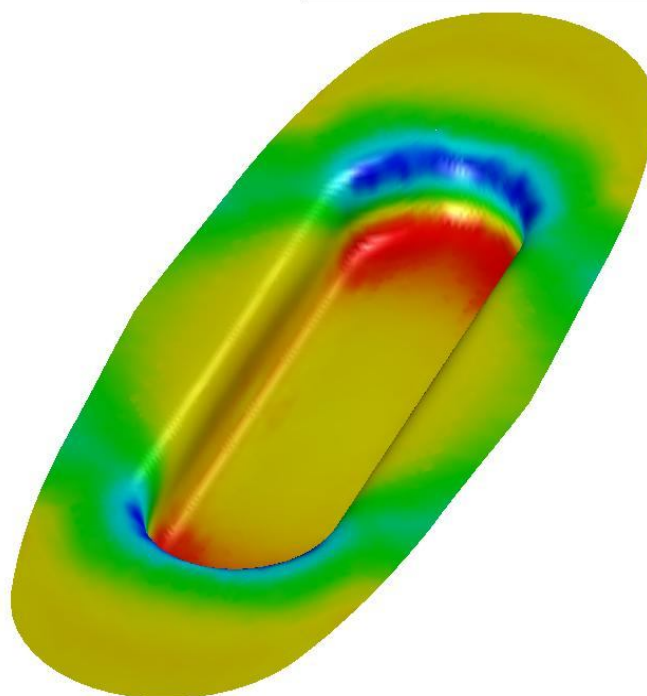
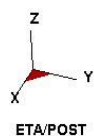
TMSN  
STEP 15 TIME: 0.259601  
FLD, middle layer



Obr. 6.17 Výtažek zadaného krytu, tažený z přístřihu sestrojeného metodou TMSN se zobrazeným mezním diagramem po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

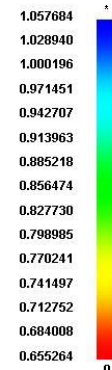
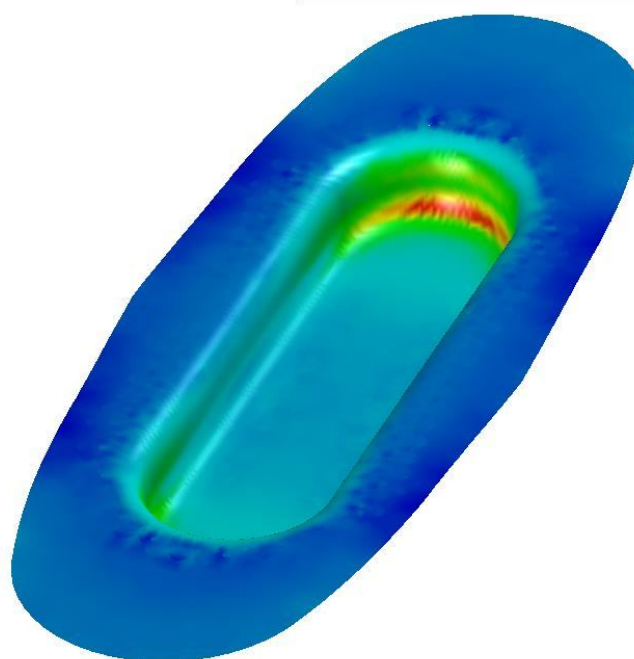
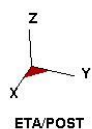


TMSN  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Minor principal strain, middle layer



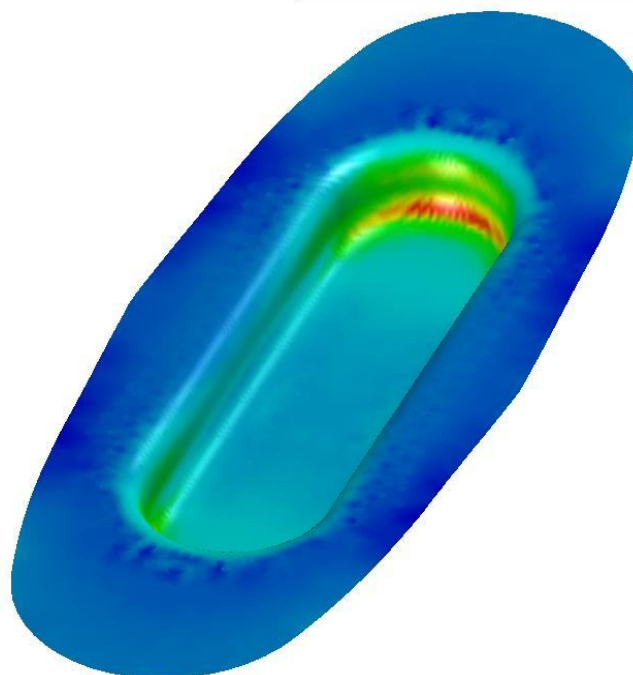
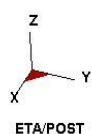
Obr. 6.18 Normálové napětí v zadaném výtažku krytu, taženém z přístřihu sestrojeného metodou TMSN po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

TMSN  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Thickness



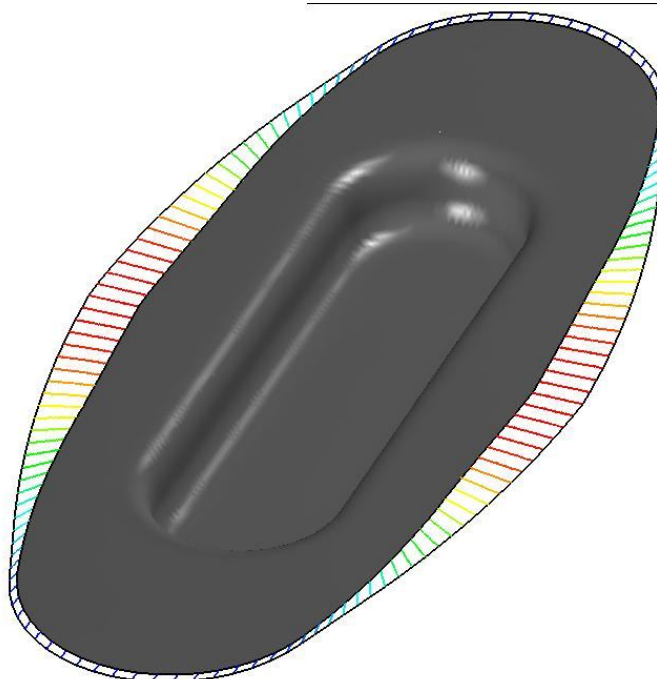
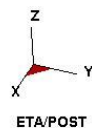
Obr. 6.19 Tloušťka zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu sestrojeného metodou TMSN po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

TMSN  
STEP 14 TIME: 0.241150  
COMPONENT: Thinning



Obr. 6.20 Ztenčení zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu sestrojeného metodou TMSN po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

TMSN  
EDGE MOVEMENT  
STEP 15 TIME: 0.259601



Obr. 6.21 Pohyb okraje přístřihu výtažku krytu, sestrojeného metodou TMSN po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=3mm)

## 7 Finální návrh technologie výroby zadaného krytu

Z dosažených výsledků simulace, uvedených v předchozí kapitole, lze zhodnotit celý proces tažení krytu posuvných dveří. Z obrázků 6.2 až 6.21 v kapitole 6 je jasné patrné že zvolené zaoblení hran výtažku splňuje nároky na výrobu, a to takové že lze tuto součást vyrobit na jednu operaci bez nutnosti použití kalibračního nástroje. Takto se sníží náklady na výrobu.

Dle kapitoly 4.5 a přílohy C7 lze vhodně vybrat přístřih pro hromadnou výrobu.

Zvýšení hospodárnosti výroby výtažku krytu posuvných dveří lze provést použitím optimálního přístřihu. Z provedených analýz bylo zjištěno, že přístřih dle ČSN 22 7303 je ekonomicky nevýhodný pro svoji zbytečně velkou plochu. Nejvýhodněji, co se týče úspory materiálu, je na tom přístřih sestrojený pomocí BSE modulu v programu Dynaform 5.2. Kryt posuvných dveří tažený z tohoto přístřihu podléhá nejmenšímu riziku vzniku prasklin v místech největšího zaoblení. Takto zkonstruovaný přístřih má optimální tvar a vyhovuje výkresové dokumentaci s regulovanými poloměry zaoblení. Proto navrhuji právě tento přístřih jako optimální variantu pro hromadnou výrobu. Další dva zkonstruované přístřihy (metoda řezů a metoda používající trajektorií maximálních smykových napětí) jsou, co se týče plochy o pár procent větší než přístřih sestrojený dle BSE modulu. Srovnání dle plochy, kterou jednotlivé přístřihy zaujímají je v tabulce 7.1.

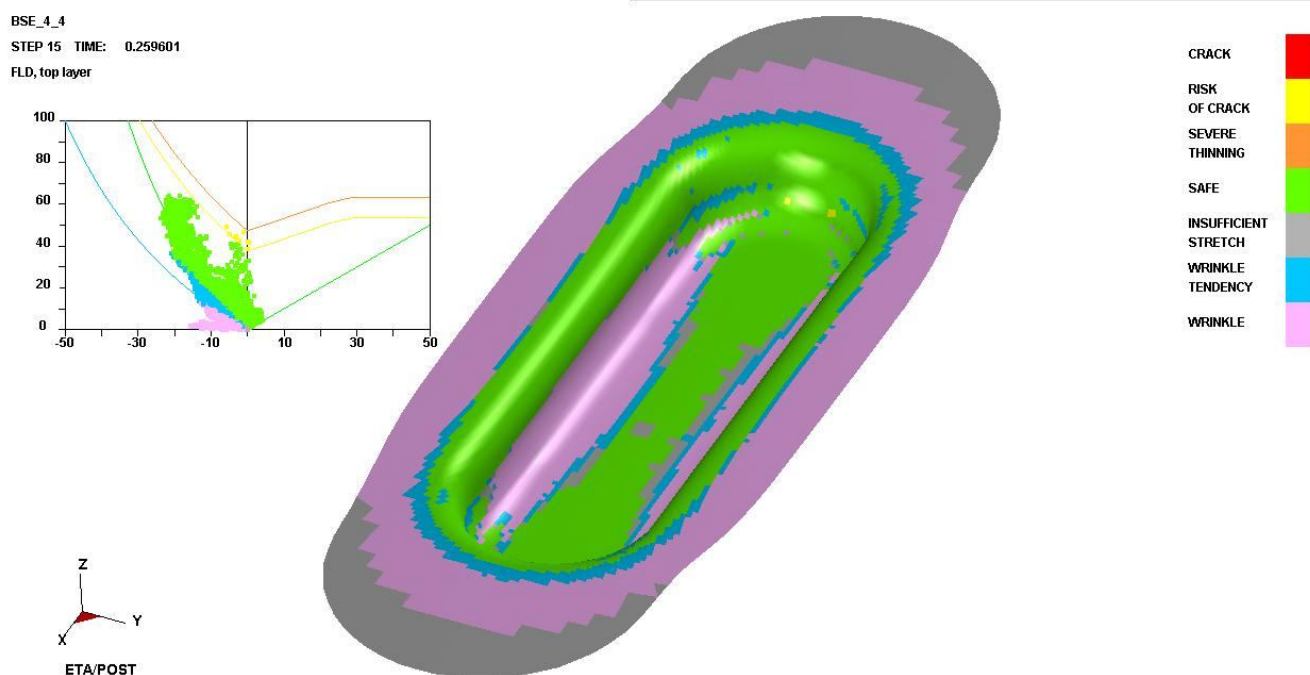
Co se týče mezního diagramu u všech přístřihů viz obrázky 6.2, 6.7, 6.12 a 6.17 se stále vyskytuje malá plocha znázorňující prasklinu. Z praxe ovšem vyplívá, že by v takto regulovaném zaoblení praskliny vznikat neměly. Může se ale stát že při dodávce plechových tabulí o menší kvalitě dojde k výskytu prasklin, což je pro hromadnou výrobu nepřijatelné, proto byla počítána ještě jedna varianta redukce zaoblení, která výskyt trhlin naprosto zamezí. Redukcí zaoblení se myslí zaoblení tažné hrany tažnice i tažníku na hodnotu 4 mm.



Tabulka 7.1 Plochy všech konstruovaných přístřihů s procentuálním vyjádřením velikosti.

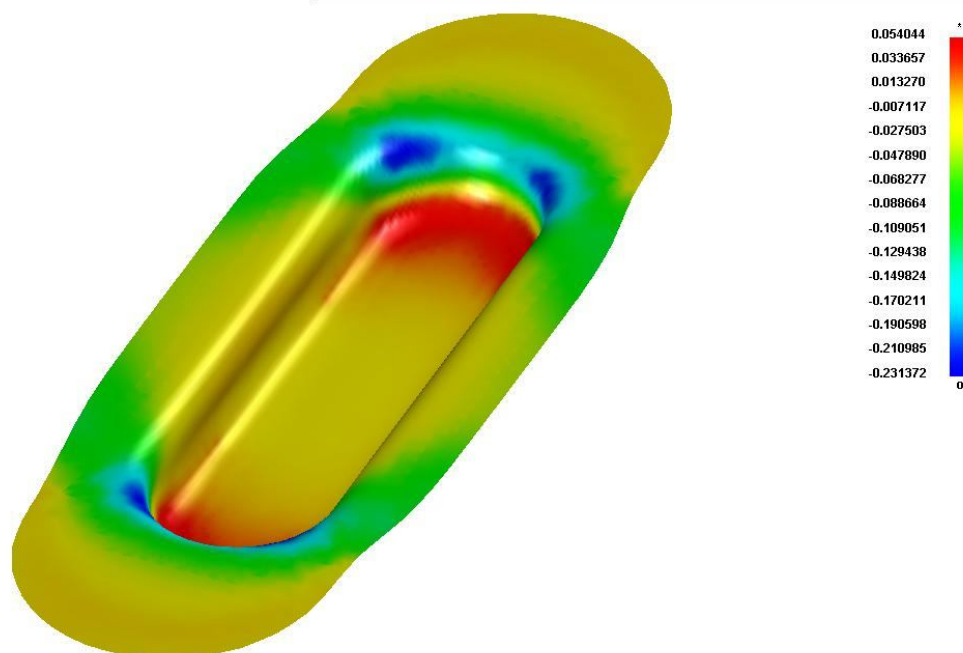
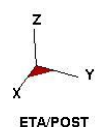
| Přístřihy   | Plocha přístřihu<br>$S$ [mm <sup>2</sup> ] | Procentuální<br>vyjádření<br>plochy přístřihů |
|-------------|--|---|
| ČSN         | 17 907,85                                  | 100 %   |
| BSE modul   | 15 249,89                                  | 85,16 %                                       |
| Metoda řezů | 16 112,94                                  | 89,98 %                                       |
| TMSN        | 16 363,62                                  | 91,38 %                                       |

### 7.1 Simulace tažení krytu posuvných dveří z přístřihu sestrojeného dle BSE modulu po úpravě zaoblení tažné hrany tažnice i tažníku na hodnotu 4 mm



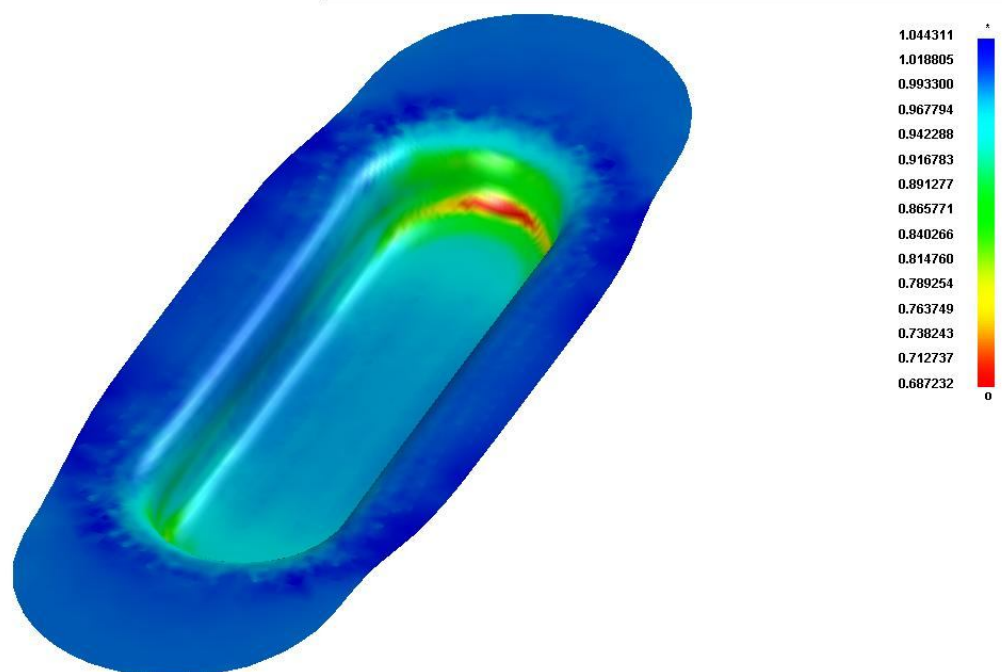
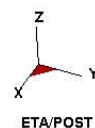
Obr. 7.1 Výtažek zadaného krytu, tažený z přístřihu dle BSE modulu se zobrazeným mezním diagramem po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=4mm)

BSE\_4\_4  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Minor principal strain, middle layer



Obr. 7.2 Normálové napětí v zadaném výtažku krytu, taženém z přístřihu dle BSE modulu po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=4mm)

BSE\_4\_4  
 STEP 15 TIME: 0.259601  
 COMPONENT: Thickness

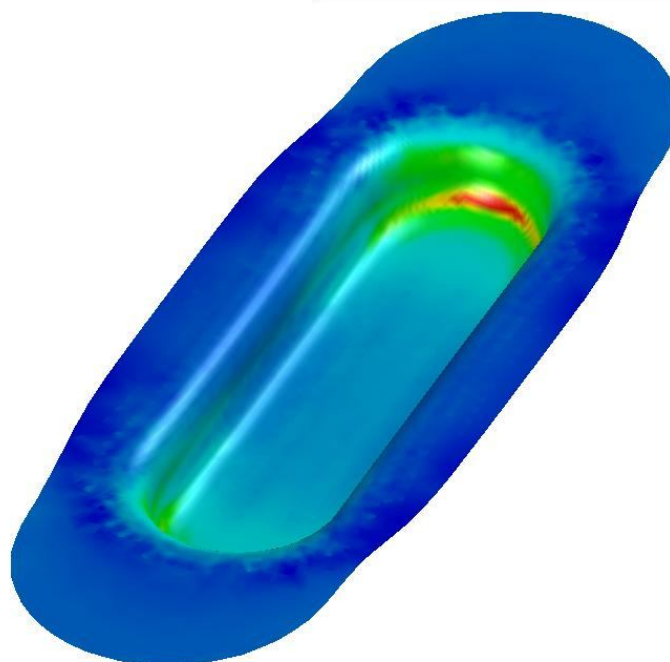
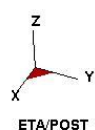


Obr. 7.3 Tloušťka zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu dle BSE modulu po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=4mm)

BSE\_4\_4

STEP 15 TIME: 0.259601

COMPONENT: Thinning



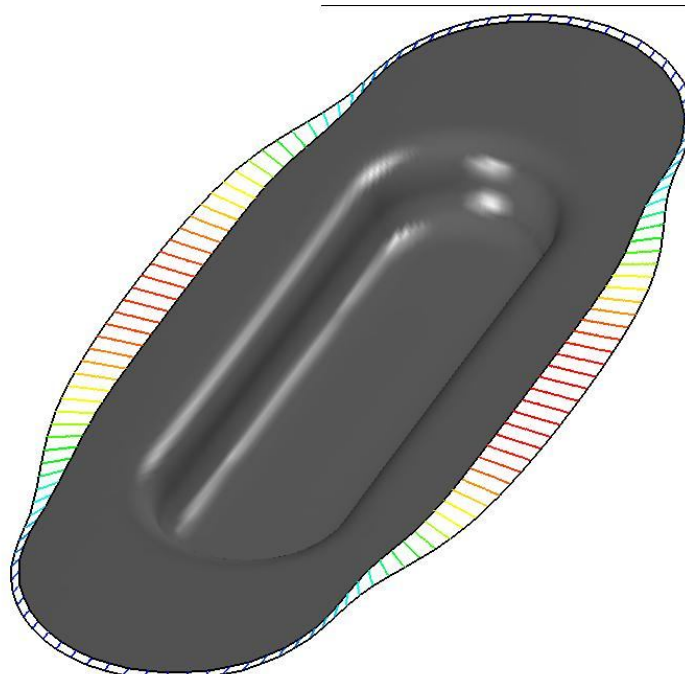
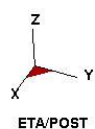
31.276825  
28.726259  
26.175692  
23.625126  
21.074560  
18.523993  
15.973427  
13.422860  
10.872293  
8.321728  
5.771161  
3.220595  
0.670028  
-1.880538  
-4.431105  
0

Obr. 7.4 Ztenčení zadaného výtažku krytu, taženého z přístřihu dle BSE modulu po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=4mm)

BSE\_4\_4

EDGE MOVEMENT

STEP 15 TIME: 0.259601



6.957409  
6.565693  
6.173977  
5.782261  
5.390545  
4.998829  
4.607114  
4.215398  
3.823682  
3.431966  
3.040250  
2.648534  
2.256819  
1.865103  
1.473387  
0

Obr. 7.5 Pohyb okraje přístřihu krytu, sestaveného dle BSE modulu po úpravě zaoblení (tažnice=4mm, tažník=4mm)

## 8 Závěr

Z výsledků bakalářské práce „*Návrh technologického postupu výroby součásti tažením z plechu s využitím MKP*“ vyplývají tyto závěry:

- Vhodnost plechu k hlubokému tažení byla zhodnocena zkouškami základními a napodobujícími. Ze zkoušek základních byla použita zkouška chemického složení plechu (viz tabulka 2.3). Výsledky rozboru prokazují, že plech vyhovuje ČSN 41 1305, která uvádí jeho směrné chemické složení (viz tab. 2.2). Poslední základní zkouškou byla zkouška jednoosým tahem (viz kapitola 2.3), kde se kontrolovaly mechanické vlastnosti plechu, smluvní mez kluzu, pevnost v tahu a tažnost. Zjištěné hodnoty meze kluzu a pevnosti v tahu (viz tabulka 2.5) odpovídají směrným hodnotám (viz tabulka 2.4). Dle ČSN 41 1305 pro ocel 11 305.21 (DC04) požaduje hodnotu tažnosti ve směru 90° vůči směru válcování plechu minimálně 36 %. Tomuto požadavku zkoušený plech vyhověl, hodnota tažnosti  $A_{80(90)}$  je rovna 41,1 % (viz tab. 2.5)
- K zjištění střední hodnoty prohloubení  $\overline{IE}$  byla provedena napodobující zkouška dle Erichsena (viz obrázek 2.2). Zjištěné hodnoty prohloubení byly u všech vzorků v přípustných hodnotách, jak požaduje ČSN 41 1305 (viz tabulka 2.6).
- K vyhodnocení tvářitelnosti plechu nestačí pouze posouzení základních a napodobujících zkoušek, ale musíme přihlížet i na nekonvenční kritéria tvářitelnosti plechu. Byli vypočítáni součinitelé plošné anizotropie mechanických vlastností plechu (viz tabulka 2.7). Pro úplnost byli vypočítáni maximální součinitelé plošné anizotropie plechu (viz tabulka 2.8). Vliv plošné anizotropie lze považovat za záporný, protože při hlubokém tažení způsobuje vznik cípů. Normálová anizotropie (viz tabulka 2.9) byla posouzena součinitelem plastické anizotropie  $r_x$ , který byl vypočítán ve všech směrech vůči směru válcování plechu, a to ve směrech 0°, 45°, 90°. Dále byl určen vážený průměr součinitele normálové anizotropie  $\bar{r}$ , který má pro plech z oceli 11 305.21 hodnotu 1,76. Dle Shawkiho třídění tedy spadá do skupiny vynikající tvářitelnost.

Exponent deformačního zpevnění (viz tabulka 2.9) byl určen ve všech směrech vůči válcování plechu  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a z těchto hodnot byla vypočítána průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n_m = 0,264$  (viz tabulka 2.9).

- Pro výtažek krytu posuvných dveří byly zkonstruovány tyto přístřihy: přístřih dle ČSN 22 7303 (viz příloha C1), přístřih využívající k sestrojení BSE modul v programu DYNAFORM 5.2 (viz příloha C3), přístřih sestrojený metodou řezů (viz příloha C5) a přístřih sestrojený metodou trajektorií maximálních smykových napětí (viz příloha C7) a. Bylo zjištěno, že přístřih stanovený dle ČSN má největší plochu. Přístřih sestrojený dle BSE modulu v programu DYNAFORM 5.2 je ze všech přístřihů nejmenší, jeho plocha je o 14,84 % menší než u přístřihu sestrojeného dle ČSN 22 7303. Přístřih dle TMSN a přístřih stanovený metodou řezů se od sebe liší velikostí plochy pouze o 1,4 %, z hlediska úspory materiálu jsou téměř totožné. Srovnání všech přístřihů je v příloze C8, náčrt je také na obrázku 4.5.
- Simulace procesu tažení výtažku krytu posuvných dveří ze všech přístřihů v programu Dynaform 5.2 (viz obrázky 5.7 až 6.21) prokázala, že nejlepší varianta pro tažení zadaného krytu posuvných dveří je ta která využívá přístřih sestrojený dle BSE modulu a to s redukcí zaoblení tažné hrany tažníku (3 mm) a tažnice (4 mm). Po takovéto redukci je možno výtažek vyrábět s pouze minimální možností vzniku praskliny, která se ovšem může objevit při dodávce plechu o nižší kvalitě, protože zde dochází k lokálnímu ztenčení plechu. Proto byla nasimulována ještě jedna možnost úprav zadaného krytu. Tato úprava se opět týká zvětšení poloměrů zaoblení tažníku. Hodnota poloměru tažníku i tažnice je stejná a to 4 mm. Při této úpravě dochází ke zmenšení normálového napětí a tudíž i k příznivějšímu vtahování materiálu do míst s největším zaoblením.
- Optimálním přístřihem pro výtažek krytu posuvných dveří je přístřih sestrojený dle BSE modulu, který je součástí programu DYNAFORM 5.2. Je zde úspora materiálu oproti ostatním přístřihům (přístřih dle ČSN 22 7303, přístřih sestrojený metodou řezů a přístřih sestrojený metodou trajektorií maximálních smykových napětí). Při první úpravě zaoblení (tažnice = 4 mm, tažník = 3 mm) se vyskytují pouze zanedbatelně malá kritická místa, které jsou dle zkušeností v unesitelné míře. Problém může vzniknout pouze při dodávce méně kvalitních tabulí plechu.

Proto byla nasimulována ještě jedna možnost úpravy zadaného výtažku krytu posuvných dveří. Opět se jedná o redukci zaoblení tažných hran. Tažná hrana tažníku i tažnice je shodný — 4 mm. Simulace je zobrazena na obrázcích 7.1 až 7.5. Z těchto obrázků je patrné, že takto sestrojené nástroje splňují všechna kritéria pro hromadnou výrobu. Dochází zde k úplnému potlačení vzniku trhlin (obr. 7.1), předpokládá se úplné odstranění zmetkovitosti při výrobě krytu posuvných dveří pro firmu HOBES, spol. s r. o.

## 9 Použitá literatura

- [1] ČADA, R. *Tvářitelnost ocelových plechů : odborná knižní monografie*. Lektorovali: L. Pollák a P. Rumišek. 1. vyd. Ostrava : REPRONIS, 2001. 346 s. ISBN 80-86122-77-8
- [2] BŘEZINA, R., ČADA, R. *Speciální technologie - technologie tváření : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1992. 257 s. ISBN 80-7078-122-X
- [3] ETA, Inc. *Eta/DYNAFORM User's Manual*. Version 5.2 Michigan : ETA, Inc., 2004. 360 s.
- [4] FRODLOVÁ, B. *Řešení napjatosti a deformací tvarového výtažku z tenkého plechu: bakalářská práce*. Ostrava : VŠB - TUO, 2007. 91 s.
- [5] ČADA, R. *Technologie - část tváření a slévání (návody do cvičení) : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : VŠB – TUO, 2000. 188 s. ISBN 80-7078-540-3

## **10 Seznam příloh**

- A1 Výkres krytu posuvných dveří.
- A2 Náskres lisu REOS HP 100.
- B1 Vyrýsování zaoblení tažníku
- C1 Konstrukce přístřihu dle ČSN 22 7303
- C2 Výkres přístřihu dle ČSN 22 7303
- C3 Výkres přístřihu vygenerovaným pomocí BSE modulu v programu DYNAFORM
- C4 Konstrukce přístřihu sestrojeného metodou řezů
- C5 Výkres přístřihu sestrojeného metodou řezů
- C6 Konstrukce přístřihu dle metody TMSN
- C7 Výkres přístřihu dle metody TMSN
- C8 Výkres porovnání všech sestrojených přístřihů